BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
Space Research and Technology Institute

MANICIPALITY OF STARA ZAGORA

BULGARIAN ASTRONAUTICAL SOCIETY

TWENTY-SECOND INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

DEVOTED TO

THE 45TH ANNIVERSARY OF THE "BULGARIA-1300" SCIENTIFIC PROGRAMME

S P A C E
E C O L O G Y
S A F E T Y

S E S 2026

PROCEEDINGS

The Conference is supported by Bulgarian National Science Fund
Contract № КП-06-МНФ/19 — 05.06.2026

2026

Organizational Committee

Honoured Chairman: Corr. Member Evelina Slavcheva

Chairman:	***Members:***
Corr. Member Petar Getsov, DSc	Prof. Tsvetan Dachev, DSc
	Prof. Dr. Hristo Nikolov
Vice-Chairman:	Assoc. Prof. Dr. Simeon Asenovski
Prof. Garo Mardirossian, DSc	Dr. Krassimir Stoyanov
	Nadezhda Chakarova, MS
Secretary:	Valeri Vassev, MS
Prof. Dr. Lachezar Filchev	Mariyana Toncheva, MS
Assoc. Prof. Dr. Alexey Stoev	Adelina Kuzeva, MS

Scientific-Programming Council

Acad. Valeriy Bondur – Russia	General Dr. Georgi Ivanov
Prof. Gerasimos Papadopoulos – Greece	General Dr. Alexander Alexandrov
Prof. Zdenek Nemetchek – Czech Republic	Corr. Member Petar Getsov, DSc
Prof. Stefano Tinti – Italy	Corr. Member Peter Velinov, DSc
Prof. Richard Haigh – United Kingdom	Corr. Member Nikolay Miloshev, DSc
Prof. Stefan Manegold – Netherlands	Prof. Garo Mardirossian, DSc
Prof. Dhara Singh Hooda - India	Prof. Nikola Vichev, DSc
Assoc. Prof. Beshir Marzouk – Egypt	Prof. Dr. Georgi Jelev
Assoc. Prof. Bogdan Zagajewski – Poland	Prof. Dr. Denitsa Borisova
Dr. Ruben Paul Borg – Malta	Prof. Dr. Boyko Ranguelov
Dr. Luc Dame – France	Mariana Zaharinova

PROCEEDINGS

Editors: Garo Mardirossian and Petar Getsov
Technical Editor: Mariana Zaharinova
Cover Design: Georgi Jelev

This Collection contains reports presented orally, or in the form of posters during the Twenty-second International Scientific Conference „Space, Ecology, Safety – SES 2026", which was held in October 2026, Stara Zagora.

The Collection includes reports which were sent within the due term and were drafted in accordance with the preliminarily announced instructions.

The reports and the accompanying abstracts are published in one of the three working languages of the Conference after the authors' choice.

© Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

p-ISSN 2603-3313 **e-ISSN 2603-3321**

Bulgaria, Sofia 1113, *Acad. G. Bonchev* St., bl. 1
Phone: (+359 2) 988 35 03
e-mail: office@space.bas.bg; http://www.space.bas.bg

CONTENTS

Plenary Session

Йорданка Семкова, Таня Иванова, Боян Киров, Катя Георгиева, Росица Колева, Цветан Дачев, Гаро Мардиросян, Александър Кузмин, Олег Вайсберг
Национална космическа програма “България-1300” – 45 години по-късно 9

Session 1

Space Physics

Peter I. Y. I. Velinov, Krasimir Krastev, Radostin Pavlov
Modeling the Ground Level Enhancement GLE 77 Event of November 11, 2025, and Its Effects on the Earth’s Environment 19

Peter I. Y. I. Velinov, Simeon Asenovski, Radostin Pavlov, Lachezar Mateev
Ionization Model CORIMIA with 3+1 Interval Approximation for Cosmic Rays 25

Tsvetan Dachev, Borislav Tomov, Malina Jordanova, Jordanka Semkova, Krasimir Krastev, Donat-Peter Häder, Viacheslav Shurshakov, Victor Benghin, William Tobiska, Brad Gersey, Benjamin Hogan
Overview of the Low Earth Radiation Environment Variations on “Mir” and International Space Station Observed by Liulin Type Instruments in 1991–2022 31

Krasimir Krastev, Jordanka Semkova, Rositza Koleva, Viktor Benghin, Sergey Drobyshev
Features of Cosmic-Ray Detection with a Two-Detector Telescope 37

Krasimir Krastev, Jordanka Semkova, Rositza Koleva, Viktor Benghin, Sergey Drobyshev
Comparison of Analytical Calculations and Geant4 Simulations of the Geometrical Factor and Mean Particle Path Length in the Liulin-Mo Detector Onboard the Trace Gas Orbiter 43

Atanas Atanassov
Computational Tool for Satellite Situational Analysis: Current Status and Future Horizons 49

Atanas Atanassov
Multiphysics Modelling and Simulation Framework for Satellite Missions: Current Status and Future Prospects 55

Daniela Boneva, Krasimira Yankova, Denislav Rusev
Observational Results and Indications of Active States in Two SU UMa Stars 62

Анатоли Радев
Анализ на три метода за определяне на периода на пулсиращата променлива звезда XZ Cygni 68

Красимира Янкова
Преход на състоянията във времето като TD-система. Подход към проблема 73

Lyubomira Raykova, Veneta Guineva, Rolf Werner
Seasonal Modulation and Temporal Distribution of Midlatitude Positive Bays Observed at the Panagyurishte Geomagnetic Observatory During Solar Cycle 23/24 and 24/25 Transitions 76

Десислава Тенева
Структура и динамика на слънчевата корона в бяла светлина по време на намаляващата фаза на 11-годишния слънчев цикъл 81

Алексей Стоев, Пенка Мъглова, Мохамед Семеида, Ахмед Абулвафа
Пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г.: наблюдения, експерименти, първи резултати 89

Огнян Огнянов, Десислава Тенева, Пенка Мъглова, Алексей Стоев
Геокосмически мониторинг на околоземното космическо пространство: наблюдения, контрол, защита 96

Ognian Ognianov
Physical and Orbital Characteristics of Objects Constituting “Space Junk” Based on Data From Optical Ground-Based Observations 101

Александър Кузев
Космическа радиация и когнитивни функции ……..…… 106

Malina Jordanova, Todor Uzunov, Frank Lievens, Alexander Kuzev
eHEALTH Wearables Detecting Cognitive Impairment: Meta-Analysis ……. 111

Session 2

Aerospace Technologies and Biotechnologies

Петър Гецов
Изследване на динамиката на Международната космическа станция при навлизане в плътните слоеве на атмосферата ……..…… 119

Konstantin Metodiev
Numerical Implementation of Control Law(s) for Propulsive Rocket Landing ……..... 123

Nikolay Zagorski
Mathematical Description of the Type Flight Model of an As532al Cougar Helicopter with an External Fire Extinguishing Device of the “Bambi Bucket BB4453” Type for Extinguishing Fires 129

Nikolay Zagorski
Analysis of Aircraft Technical Operation Processes Using Markov Processes and Chains ……..… 134

Павлин Граматиков
Енергийни, топлинни и водни ресурси на системи за животоподдържане на повърхността на Луната и Марс ……..….. 140

Павлин Граматиков
Ресурси и ефективност на космически оранжерии на пилотируеми космически кораби …….. 146

Павел Пенев
Основни моменти от геополитическото противопоставяне в Космоса между Изтока и Запада и влиянието му върху развитието на космическата техника и технологии …….. 152

Павлин Граматиков, Джулиан Тахов
Моторно-витлови групи за квадроплан ……..…….. 160

Филип Илиев, Георги Сотиров
Прогностичен модел за адаптивно радиоелектронно противодействие на рояци БЛА чрез многоканална Калманова филтрация ……..... 166

Georgi Georgiev, Dimo Zafirov
Foresight Method in the SUDEM Project and Future Projects ……..……..……..… 172

Georgi Georgiev, Dimo Zafirov
Hybrid UAV Artificial Intelligence ……..…… 175

Стойко Стойков
Пирохидравличен метод за принудително отделяне на товари ……..……... 179

Margarita Dimitrova, Adelina Miteva
Artificial Intelligence in Scientific Research and Its Role in the Green and Digital Transition ……..… 183

Петя Табакова
Модифициране на повърхността на сплав Ti6Al4V ……..... 189

Session 3

Remote Sensing and Geoinformation Systems

Dimitar Makariev, Plamen Trenchev
Regime-Conditioned Coverage of Monte Carlo Intervals for TROPOMI-Derived Surface NO_2 During Winter Stagnation in the Sofia Basin ……..……..….. 197

Plamen Trenchev
Gap Filling of Cloud-Obscured Satellite NO_2 Data as Geometric Navigation on a Reconstructed Attractor: A Conceptual Framework ……..….. 206

Adrian Yordanov
Comparative Evaluation of Validation Approaches for Water Body Mapping Using PlanetScope Imagery ……..……..... 213

Михайло Мураш
Количествен пространствен анализ на наводнения и растителна динамика по данни от Sentinel-1 и Landsat в Google Earth Engine …… 218

Борислав Борисов
Методика за термално дистанционно изследване на връзката между подземните и повърхностните води с безпилотна летателна система ……..…… 224

Борислав Борисов
Идентифициране на естественото дрениране на подземни води чрез термално дистанционно обследване с безпилотна летателна система – пример от ВС „Извора“, с. Крупник ……..…… 230

Христо Николов, Мартина Димитрова
Определяне на мътност на водата в язовир „Пчелина“ по данни от сателитни изображения от Sentinel-2 и Landsat 9 ……..……..…… 236

Petru Ciocani, Milen Chanev, Alexander Gikov, Ilina Kamenova, Pavel Popov, Lachezar Filchev
Integrating Multispectral, Thermal and RGB UAV Imagery for the Documentation and Protection of the Archaeological Site of Staroseltsi-Kaleto ……..……..…….. 242

Ива Иванова, Наталия Станкова
Мониторинг на пространствено-времевата динамика на комплекс „Ропотамо“ за периода 2013–2025 г. ……..… 249

Andrey Stoyanov, Nadya Yanakieva, Temenuzhka Spasova
An Experiment for Monitoring the “Snezhnika” Glacieret in the Pirin Mountains Using High- and Medium-Resolution Satellite Data ……..……..... 255

Temenuzhka Spasova, Miroslav Y. Tsvetkov, Adlin Dancheva, Nadya Yanakieva, Andrey Stoyanov
Thermal and Spectral Mapping of Deception Island, Antarctica ……..…….…….. 263

Iskren Ivanov, Lachezar Filchev
Lunar Exogenic Processes Posing Hazards to Long-Term Lunar Infrastructure …….……..…… 271

Mihaela Tsvetkova, Lachezar Filchev
Assessment of Biotic Stress in Spruce Forests Using Remote Sensing: A Literature Review …….. 277

Mihaela Tsvetkova, Lachezar Filchev
Spectral Characteristics of Vegetation as Indicators of Early Stress in Forest Ecosystems: A Literature Review …… 284

Session 4

Ecology and Risk Management

Boyko Ranguelov, Rosen Iliev
Spatial Pattern of Global Strong Seismicity: A Fractal-Gravity Integrated Analysis …..…….. 293

Димитър Димитров, Пиер Бриол
InSAR и GNSS мониторинг на „Роя“ земетресения на остров Санторини от януари до март 2025 г. ……..…….. 298

Lachezar Filchev, Garo Mardirossian, Boyko Ranguelov, Maria Dimitrova, Lyubka Pashova, Rosen Iliev
SPARC: Space-Based Precursors of Cascading Multi-Hazard Events in Bulgaria – Concept and Expected Results ……..……..…….. 303

Garo Mardirossian, Boyko Ranguelov
Cascade Multirisk Events – Causes, Origin, Interactions ….....……. 310

Стефан Шопов, Гаро Мардиросян, Мария Димитрова, Павлин Граматиков
Перспективи за използването на геопространствени платформи за регионален мониторинг на опасни явления: опитът с Oracle Aerospace Shield ……..…… 316

Rosen Iliev, Boyko Ranguelov, Garo Mardirossian, Lachezar Filchev
Landslide Susceptibility Mapping Using a Spatial CV Random Forest Approach: A Case Study of Blagoevgrad Province, Southwest Bulgaria ……..…… 323

Мария Димитрова
Пространствено разпределение на праховото замърсяване в град Пловдив …… 330

Мария Димитрова, Елица Узунова, Иван Стоев
Връзка между териториалното разпределение на праховото замърсяване и зелените площи в град София ……..……..…… 335

Георги Колешански, Биляна Костова, Ралица Берберова
Екологични ефекти от въвеждането на стандарти за допустими вредни емисии на автомобилите върху качеството на атмосферния въздух във Франция …..……..... 342

Йоана Чомпалова, Биляна Костова, Ралица Берберова
Пресноводните ресурси в България и фактори за тяхното състояние …..……..... 348

Plamen Trenchev, Daniela Avetisyan, Elena Trencheva
Preservation of Extreme NO_2 Episodes Under Cloudy Conditions in Two European Stagnation Basins: Sofia and the Po Valley ……..……..…… 358

Камелия Радева
Методика за междинен екологичен мониторинг и оценка на здравния статус на влажните зони: концептуална рамка ……..……..…….. 366

Геннадий Маклаков, Надежда Георгиева, Петър Гецов, Оксана Кудрявцева
Технологията за кардиокохерентност в практиката за възстановяване след стрес и осигуряване на надеждност в професионалната дейност на авиационния и космическия персонал ……..…….. 374

Геннадий Маклаков, Надежда Георгиева, Гаро Мардиросян, Момчил Караиванов, Оксана Кудрявцева
Система за виртуална реалност, имитираща околната среда в Родопите и Рила, с цел формиране на кардиокохерентност у операторите на ергатични комплекси ……... 380

Нели Сивева, Калин Крумов, Весислава Тотева, Томислав Скандалиев, Христофор Скандалиев
Технологични предизвикателства при първичната преработка на отпадъчен памучен текстил за производство на висококачествена целулозна суровина ..…….….. 386

Nadya Marinova
Application of Conditional and Unconditional Terms of Construction Products ……..…… 392

Nadya Marinova
Modern Concepts of Corporate Risk Management in Investment Projects ……..…..... 401

Зоя Асенова
Влияние на UV-A, UV-B, UV-C върху зрителната система и защитни материали …….. 410

Nikola Pirovski
Altered States of Consciousness as a Safety Factor in Long-Duration Spaceflight ……..…… 414

Nikola Pirovski
Ethical and Philosophical Dimensions of Human Presence in Space ……..… 419

Ара Хачмериян
Вариабилност на сърдечната честота – физиологичен индикатор при оценка на операторската ефективност в екстремни условия …..……..…… 423

Роксандра Памукова-Майкълсън
Най-ранните природни науки, иновации и медицина в Европа ……..…… 431

Kaymet Baadieva, Milen Chanev, Georgi Jelev
European and National Legal Aspects of Ownership of Geospatial Data Obtained Through Satellite and UAV Technologies ……..…….....……..…….. 439

Plenary Session

НАЦИОНАЛНА КОСМИЧЕСКА ПРОГРАМА „БЪЛГАРИЯ-1300“ – 45 ГОДИНИ ПО-КЪСНО

Йорданка Семкова[1], Таня Иванова[1], Боян Киров[1], Катя Георгиева[1], Росица Колева[1], Цветан Дачев[1], Гаро Мардиросян[1], Александър Кузмин[2], Олег Вайсберг[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Институт за космически изследвания – Руска академия на науките
e-mail: jsemkova@stil.bas.bg

Ключови думи: *Национална космическа програма „България-1300“, космическа физика, дистанционно сондиране на Земята*

Резюме: *Националната космическа програма „България-1300“ е едно от най-значимите достижения и наследства на космическите изследвания в нашата страна. Тя има много аспекти. Представена е в стотици публикации, в монографии и много други документи. През изминалите години неведнократно е докладвана и на конференциите SES. Разказаното по-долу не представлява пълната история на тази програма, нито претендира за изчерпателност. Ние, авторите, сме участници пряко в работата по програмата. Поради това, в доклада се преплитат документални факти с наши спомени и оценки. Той е посветен на всички онези, които направиха възможна реализацията на националната космическа програма „България-1300“.*

NATIONAL SPACE PROGRAM “BULGARIA-1300” – 45 YEARS LATER

Jordanka Semkova[1], Tanya Ivanova[1], Boyan Kirov[1], Katya Georgieva[1], Rositza Koleva[1], Tsvetan Dachev[1], Garo Mardirosyan[1], Alexander Kuzmin[2], Oleg Vaisberg[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Space Research Institute – Russian Academy of Sciences
e-mail: jsemkova@stil.bas.bg

Keywords: *National Space Program "Bulgaria-1300", space physics, remote sensing of the Earth*

Abstract: *The "Bulgaria-1300" national space program stands as one of the most significant achievements and legacies of space research in our country. It is multifaceted, documented in hundreds of publications, monographs, and numerous other records. Over the years, it has also been presented on multiple occasions at SES conferences. The account that follows does not constitute the program's complete history, nor does it claim to be exhaustive. As the authors, we were directly involved in the program's execution; consequently, this report intertwines factual records with our own recollections and assessments. It is dedicated to all those who made the realization of the "Bulgaria-1300" national space program possible.*

Въведение

Решаващо за космическите изследвания в България през 20 век беше участието на нашата страна в програмата Интеркосмос”, започнало още с основаването на тази програма през 1967. Програмата “Интеркосмос” за международно сътрудничество в изследването и използването на космическото пространство за мирни цели даваше възможност на всички страни от бившия социалистически лагер, както по-късно и на други страни, да участват в космическите изследвания в желаната от тях научна област и със своя научна апаратура, като използват безвъзмездно съветската космическа техника и съоръжения. Академиците Любомир Кръстанов и Кирил Серафимов извършиха огромна научно-организационна дейност, участвайки активно в създаването на “Интеркосмос”, както и включването на България в нея.

Националната космическа програма „България-1300“ е едно от най-ярките проявления на възможностите и резултатите от участието на България в “Интеркосмос”.

За националната космическа програма „България-1300“ и хората, които я реализираха

Националната космическа програма „България-1300“ включва две области на изследване: космическа физика и дистанционно сондиране на Земята, и два изкуствени спътника на Земята, на борда на които се реализират съответно горните две области на изследване. Първият спътник, наречен „Интеркосмос – България-1300“ (“ИК-Б-1300”) е предназначен за изследване на взаимодействието между земната магнитосфера, йоносферата и термосферата [1, 2]. Той е реализиран на съветски спътник от типа „Метеор“ и е изведен в близка до полярна орбита на около 900 km височина на 7 август 1981 г. Носи 12 българско-съветски научни апаратури за измерване на плазмени параметри, потоци от частици, електрични и магнитни полета, и за оптични измервания. Вторият спътник под наименованието „България-1300 – II“ (“Б-1300-II”) носи български и съветски научни апаратури, предназначени за дистанционно наблюдение на Земята от космоса. Той е реализиран на спътник от типа „Метеор-Природа“ и е изведен на 10 юли 1981 г. на 650 km слънчево-синхронна орбита [3].

По-подробно научните задачи на всеки от спътниците и експериментите на тях, българските научни апаратури на борда им и част от колективите зад всеки от експериментите са описани в публикацията на Т. Иванова в сборника доклади на конференцията SES 2011 [4] и в литературата към нея, и поради това по-долу ще припомним само някои основни факти и посочим непубликувани такива.

Идеята за програмата е на колектива от български учени К. Серафимов, Д. Мишев, М. Гогошев и И. Кутиев, а осъществяването ѝ е в партньорство с институтите на Съветската академия на науките – ИКИ и ИЗМИРАН, както и с конструкторското бюро на спътниците от серията “Метеор”. Изключително активна подкрепа имахме от акад. Б.Н. Петров и акад. В.А. Котелников, председатели на “Интеркосмос”, както и от Председателя на БАН акад. А. Балевски.

Ръководители на програмата „България-1300” бяха акад. К. Серафимов и акад. А.Г. Йосифян, съответно от българска и съветска страна. Директорът на ИКИ-РАН акад. Р.З. Сагдеев посочи за свой заместник и отговорник за проекта В.М. Балебанов.

Директори и научни ръководители бяха: за “ИК-Б-1300” – Ст. Чапкънов, И. Кутиев и М. Гогошев/ В. Адаско (СССР), а за “Б-1300-II” – проф. Д. Мишев/ проф. И. Ветлов (СССР).

В тази програма инициативата и приносът на българските учени, главно от Централната лаборатория за космически изследвания – БАН (ЦЛКИ), сега Институт за космически изследвания и технологии – БАН, е в разработката на целите и методиките за измервания, създаването на научните апаратури за тяхната реализация, както и на средствата за автономни изпитания на научните апаратури, приемането, обработката и анализа на данните.

Основната задача на изследванията на спътника „Интеркосмос – България-1300“, е разкриването на механизма на пренос на енергия от Слънцето към Земята във времето и пространството чрез комплексен подход към изучаването на явленията, протичащи в йоносферата и магнитосферата.

Основна цел на изследванията на спътника „България-1300 – II“ е да се установи връзката между различни природни образувания и техните състояния с отразеното и излъчено електромагнитно лъчение във видимия и близкия инфрачервен и СВЧ диапазони на електромагнитния спектър [5].

На Фиг. 1–4 са показани фотографии на някои важни моменти от работата по организацията на космическата програма „България 1300“.



Фиг. 1. Подписване на научната програма „България-1300“ от Председателя на БАН акад. Балевски, 1979 г.



Фиг. 2. Акад. К. Серафимов, акад. Д. Мишев, акад. А. Балевски, ст.н.с. И. Аршинков – обсъждане на текущи въпроси по „България-1300“, 1980 г.



Фиг. 3. Среща на български участници с делегация на "Интеркосмос" за обсъждане на „Интеркосмос – България-1300", май 1979 г., Ст. Загора



Фиг. 4. Съвещание на специалисти от двете страни по „България-1300 – II", Москва, 1980 г.

По-долу са изброени апаратурите, техните кратки наименования, екипите от български специалисти и съветски отговорници, работили по тях, и по получаването, и обработката на данните от двата спътника.

За спътника „Интеркосмос – България-1300" те са: Йонен уловител (П6-ИЛ)/ Т. Иванова, Т. Самарджиев, С. Сапунова, Г. Гдалевич; Йонен дрейф (ИД-1)/ Л. Банков, Б. Киров, М. Гушева, В.Г. Истомин; Йоносферна плазма (П7-ЗЛ)/ Т. Иванова, К. Георгиева, П. Костов, В. Губский; Електронна температура (ДИЕТ)/ В. Марков, Д. Теодосиев, Х. Близнаков; Анализатор на маси и енергии на йони (АМЕЙ)/ П. Неновски, Й. Семкова, Р. Колева, Н. Кънчев, О. Вайсберг, В. Смирнов; Анализатор на нискоенергийни протони и електрони (АНЕПЕ)/ Ц. Дачев, И. Богомилов, Ю. Матвейчук, Д. Крежова, М. Телцов; Спектрометър на протони (ПРОТОН-1)/ К. Казаков, И. Георгиев, Н. Николаева; Електростатични полета (ИЕСП)/ Г. Станев, Д. Теодосиев, М. Петрунова, В. Чмырев; Магнитно поле (ИМАП)/ А. Бочев, И. Аршинков, Л. Жузгов; Ултравиолетова спектрометрична система (ФОТОН-1)/ М. Гогошев, Б. Мендева, С. Сергойчев, Л. Смирнова; Спектрофотометър за видимата област (ЕМО-5)/ М. Гогошев, Н. Петков, Ц. Гогошева, А. Кузмин; Оптическа лазерна светлоотражателна система (ОЛСС)/ Н. Георгиев, Ал. Хаджийски, Вл. Диков, Г. Кръстев. Изключителен принос за високото качество на апаратурите имаха и техниците А. Кънчев, Г. Карамишев, Г. Костов, Ст. Устичков, К. Кънев, Н. Мизов, Ю. Чавдаров, И. Боянов, К. Пантелеев, Пл. Хинов, З. Цветков, Е. Вътев и др. В обработката и анализа на данните от спътника, освен гореизброените български учени, се включиха активно и Д. Данов, Н. Банков, Л. Тодориева, Н. Дончева, М. Герджикова, В. Гинева, П. Стоева и др.

За спътника „България-1300 – II" апаратурите и техните кратки наименования са: Многоканален спектрометър във видимата и близката инфрачервена област (СМП-32), Микровълнов радиометър (РМ-1), Блок управление – Бордови компютър на базата на български микропроцесор СМ600 (БУ). Българският колектив, работил по апаратурите и анализа на данните включва Д. Петков, А. Крумов, Б. Пеев, А. Генчев, Б. Ценов, Т. Назърски, Ч. Левчев, Д. Димитров, С. Ковачев, М. Милчев, К. Тонев, Л. Кришкова, С. Живков, А. Тотев, В. Донев, Г. Каменов, Г. Мардиросян, М. Иванов, И. Иванова, Сп. Делистоянов, М. Фратев, Д. Димитров, космонавтът Г. Иванов, В. Бойчева, К. Бакалова, Р. Кънчева, В. Петрова, А. Стоименов и др.

Днес нашите по-млади колеги и посетители на института с удивление научават, че ръководителите на научните програми за полета на спътниците „България-1300" акад. Кирил Серафимов и акад. Димитър Мишев по онова време бяха на възраст под 50 години, следващото ниво ръководители бяха на около 40 години, а средната възраст на колективите, създали научните апаратури и експерименти за тези програми беше около 30 години. За немалка част от участниците и ръководителите на експериментите това беше първото им участие в космически проект. Основна характеристика на ръководството на космическата програма „България-1300" беше съчетанието на висока ерудиция и професионална компетентност, стратегическо мислене, организаторски качества и изключително чувство за отговорност. Тези качества изиграха решаваща роля за сплотяване и мотивиране на всички участници в проекта. Успехът стана възможен благодарение на всеотдайния труд на всички български участници в програмата и на пълноценното сътрудничество със съветските партньори.

На Фиг. 5–7 са показани фотографии на български и съветски участници в предполетните изпитания на апаратурите, монтирани на двата спътника, които бяха проведени през лятото на 1981 г. на космодрума в Плесецк, Русия.



Фиг. 5. Участници в предстартовите изпитания на спътника „Интеркосмос България-1300“, юли, 1981 г, Плесецк



Фиг. 6. Част от участниците в предстартовите изпитания на апаратурите на „Интеркосмос България-1300“ в изпитателната зала на спътника



Фиг. 7. Участници в предстартовите изпитания на “България-1300 – II” в Плесецк, юни, 1981 г.

Някои научни и технологични резултати от националната космическа програма „България-1300“

Погледната от дистанцията на 45 години, космическата програма „България-1300“ впечатлява с научния и технически мащаб, и с размаха си – само за една година са изведени в космоса 2 спътника и една ракета с около 20 научни апаратури на борда им, разработени главно в Централната лаборатория за космически изследвания – БАН (ЦЛКИ–БАН), създадени са системите за автономни изпитания на космическите апаратури, започнато е изграждането на центрове за приемане и обработка на данните от спътниците, и на методики за анализ на данните. Уникални детайли за апаратурите бяха изработени от български промишлени предприятия. Това се случва само две години след напрегнатата работа по мащабната научна програма за полета на първия български космонавт Г. Иванов. Двата спътника и научните апаратури на борда им работеха безотказно неколкократно по-дълго от определения им гаранционен срок.

Особено забележителен е самият замисъл на експериментите на двата спътника.

Решаващо преимущество на спътника „Интеркосмос – България-1300“ е комплексният подход – различните физични характеристики могат да бъдат измервани едновременно и практически в една и съща област на пространството. Към това се добавят и възможностите за сравнение на някои от измерванията с тези на ракетата „Вертикал-10“ и американският спътник Dynamics Explorer, изведени в космоса през същата 1981 година. На „Вертикал-10“ са използвани адаптирани варианти на апаратурите за изследване на йоносферната плазма от „Интеркосмос – България-1300“ и полета е предварително планиран така, че ракетата да премине непосредствено в близост до „Интеркосмос – България-1300“. Спътникът проследява йоносферата по своята орбита, „Вертикал-10“ преминава през нея във височина. В точката на тяхното сближаване измерванията могат непосредствено да бъдат сравнени. Към тях се добавят сравнения с данни от Dynamics Explorer и от наземни наблюдения, а на по-късен етап и сравнения с физични модели. Така са получени оригинални резултати за йоносферната конвекция и главния йоносферен провал [6-8], вертикалната структура и йонния състав на горната йоносфера [8–12], прехода между кислородната и водородната плазма [13–14], дребномащабните токове [15–17]. Алфвеновите структури и изключително силни полета [18-20], преноса на енергия от магнитосферата към атмосферата [21], физиката на полярните сияния, аврорална овал и полярната шапка, субавроралното електрическо поле [22–28] и т.н. Изследвано е влиянието на дребномащабните плазмени смущения върху потенциала на спътника [29]. „Интеркосмос – България-1300“ осигури голяма база данни от събития свързани с изсипващи се частици, което позволи идентифицирането на множество inverted – V събития и техните параметри, извлечени от комплексни измервания на борда на спътника [30]. Български и съветски участници в програмата, включително проф. И. Подгорни, в поредица публикации анализират плазмената конвекция, локализираните аврорални структури, електромагнитните смущения и токовете по магнитните силови линии, и развиват идеята, че генераторът на наблюдаваната система от електрически полета и токове трябва да се търси далеч от йоносферата – в токовия слой на магнитосферната опашка [7, 16, 18, 31–32].

Научната програма на спътника „България-1300 – II“ допринесе за решаване на задачи в областта на екологията, климатологията, корабоплаването, опазването на природните ресурси и др. Многоканалния спектрометър СМП32 бе използван в експерименти свързани с обработката и анализа на многоканални спектрални видеоданни за различни еталонни природни обекти. Измерванията на микровълновото излъчване в 4 спектрални интервала на СВЧ радиометрите РМ1 и РМ2 позволи да се изследва с висока точност динамиката на температурата на морската повърхност, пълното влагосъдържание на атмосферата, водното съдържание на облачната покривка над моретата и океаните, определяне на зоната на валежите, свойствата на ледената и снежната покривка. Паралелно на българска територия се правеха подспътникови изследвания от самолети - лаборатории и с наземни средства [3, 5].

Наследството на националната космическа програма „България-1300“

Активната работа на „Интеркосмос – България-1300“ е 18 месеца, но научният живот на неговите данни продължава десетилетия и това е може би най-доброто доказателство за качеството на данните, и успеха на програмата. През 1990-те години измерванията са използвани за изследване на бързите субаврорални йонни дрейфове – SAID – чрез съвместен анализ с американския Dynamics Explorer [33]. През 2000-те години старите данни отново са използвани за изследване на спектрите на електрическите флуктуации, размерите и интензитета на токовете по магнитните силови линии, нискоширочинните плазмени неоднородности и за сравнение със съвременни магнитосферни модели [34–38]. В публикация от 2017 г. Подгорни и съавтори доразвиват предходните си изследвания, и свързват

генерирането на електрическото поле в магнитосферната опашка с Hall ефекта в токовия слой [39]. Дори десетилетия след полета измерванията на електрическото поле остават ценни за разработване и проверка на нови методи за обработка на данните от електрически сонди [40].

Съвместните измервания на интензивността в радио, близкия инфрачервен и оптичния диапазони, осъществени чрез комплекса научна апаратура на борда на спътника „Метеор-Природа“ на „България-1300 – II“, позволиха повишаване на ефективността при решаването на задачи, свързани с океанската повърхност и атмосферата. Получените резултати подчертаха необходимостта от създаване в бъдеще на специализирани многоканални интелигентни сканиращи системи, работещи на конкретни дължини на вълната в горните диапазони [41].

Важен аспект е социално-политическият – програмата имаше широко обществено и медийно отразяване, някои от участниците в работата по нея бяха наградени с високи държавни ордени, а всички получиха паметни грамоти и медали. В края на 1981 г. в Пловдив на изложба на ТНТМ (Техническо и научно творчество на младежта) беше организиран щанд, посветен на космическия проект „България-1300“, на който бяха представени фотографии от работата по спътниците и макети на апаратурите на двата спътника (Фиг. 8). Изложбата се посрещна с голям интерес, особено сред младите хора. Почти 45 години по-късно, през 2025 г. бе поставен и тържествено открит паметник на спътника „Интеркосмос – България-1300“ в Стара Загора с активното съдействие на ИКИТ–БАН, местната общественост и общински власти.



Фиг. 8. Участници в космическата програма „България-1300“ на щанда на изложбата на ТНТМ, посветен на програмата, Пловдив 1981 г.

Много важен беше международният отзвук. През декември 1981 г. в София се провежда българо-съветски научен семинар, посветен на първите резултати от изследванията с комплекса „България-1300 – II“, на който са изнесени 51 научни доклада и съобщения. На него акад. А. Г. Йосифян отбелязва: „Рядкост е в историята на космическите изследвания, когато само четири месеца след старта на даден космически обект, учените и специалистите се събират и обсъждат толкова много научни резултати, свързани непосредствено с работата на комплекса научна апаратура на борда…“. Като че ли най-точно характеризира направеното директорът на Института за космически изследвания към Академията на науките на СССР акад. Р. З. Сагдеев, който обобщава: „Космическата програма „България-1300“ е най-мащабният, най-обоснованият в научно отношение проект, който отделна страна изпълнява по програмата „Интеркосмос“... [5]. Показателен за международното значение на проекта е и съвместният българо-американски семинар, посветен на данните от „Интеркосмос – България-1300“ и Dynamics Explorer, състоял се през 1982 г. в Ст. Загора, след който бяха направени редица съвместни публикации по данните от двата спътника. Резултатите от „България-1300“ бяха признати от Международния астронавтически конгрес като едно от 3-те най-значими космически постижения на човечеството през 1981 г. – заедно с полета на американската совалка „Челинджър“ и френско-съветската мисия към Венера.

Изключително значими са дългосрочните измерения на програмата. Сформирани по тази програма научни колективи и днес продължават сътрудничеството си в световните космически изследвания, и внасят съществен принос в тях. Научният и технологически опит от „България-1300“ е използван, и развит в последващи големи международни космически мисии с българско участие – например „Венера-Халей“, „Фобос“ „Интербол“, „АПЕКС“, „Марс 96“, експерименти на пилотираната космическа станция „Мир“, МКС и др.

За жалост, както нерядко се случва в нашата страна, големият успех не остана ненаказан. В средата на 80-те години на 20 век част от ръководството на националната космическа програма „България-1300“ – акад. К. Серафимов, проф. М. Гогошев, проф. И. Кутиев бяха отстранени от работа в ЦЛКИ–БАН, други участници също имаха неприятности. Последваха сериозни организационни и структурни промени. Но това е друг разказ.

Заключение

Националната космическа програма „България-1300“ донесе уникални научни и технологични резултати, силно подчерта възможностите на нашата страна в световните космически изследвания и увеличи конкурентоспособността ни за участие в следващи големи международни космически мисии.

Тя стана възможна главно благодарение на силната държавна подкрепа за науката и космическите изследвания, на участието на България в международната научна програма „Интеркосмос“, на възможностите на българската промишленост за изработка на уникални компоненти за космически приложения, на всеотдайния, колективен и целенасочен труд на българските и съветски участници в този проект.

Благодарности

Авторите благодарят на А. Крумов за предоставените материали по „България-1300 – II“.

Литература:

1. Serafimov, K. et al., 1982. Probe experiment for measurement of plasma parameters and ion drift velocities in the ionospheric plasma aboard the Intercosmos-Bulgaria 1300 satellite. Acta Astronautica, 9(10), 637–640.
2. Serafimov, K. et al., 1983. First results of the Bulgaria-1300 satellite experiment. Acta Astronautica, 10(5–6), 263–268. DOI: 10.1016/0094-5765(83)90075-9.
3. Сборник доклади „Дистанционно сондиране на Земята със спътник Метеор-Природа”. Руско-български експеримент (Б-1300-II).
4. Иванова Т., 2011, 30 ГОДИНИ СПЪТНИЦИ "БЪЛГАРИЯ-1300", Proceedings SES 2011, SSN 1313 – 3888, pp. 9–16.
5. Мишев Д., Космическите изследвания в България, изд. Марин Дринов, 2004.
6. Bankov, L., et al, 1983. An instrument for total ion drift velocity measurements aboard the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite. Advances in Space Research, 2(7), 71–74. DOI: 10.1016/0273-1177(82)90152-1
7. Dubinin, E.M, et al, 1983. Large-scale and small-scale motions of plasma in the upper ionosphere based on data of the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite. Cosmic Research, 21(5), 546–553.
8. Kirov, B., et al, 1985. Main ionospheric trough studied from Intercosmos-Bulgaria-1300. Advances in Space Research, 5(4), 87–91. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90121-8.
9. Georgieva, K., et al, 1989. Одновременные измерения параметров ионосферной плазмы методом цилиндрического зонда Лэнгмюра на ракете «Вертикаль-10» и спутнике «Интеркосмос-Болгария-1300». In: Gringauz, K.I. (Ed.), Ракетное зондирование верхней атмосферы и ионосферы до высоты 1500 км. Rostov University Publishing House, Rostov-on-Don, pp. 110–114.
10. Gdalevich, G.L., et al, 1984. Mid-latitude rocket measurements of plasma irregularities associated with topside density depletion. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 46(10), 953–956. DOI: 10.1016/0021-9169(84)90036-9.
11. Wernik, A.W., et al, 1986. Vertical-10 rocket measurements of mid-latitude, nighttime F region irregularities. Radio Science, 21(6), 1021–1032.
12. Afonin, V.V., et al, 1989. Высотные профили температуры электронов и ее флуктуаций до высоты 1500 км по данным ракеты «Вертикаль-10». In: Gringauz, K.I. (Ed.), Ракетное зондирование верхней атмосферы и ионосферы до высоты 1500 км. Rostov University Publishing House, Rostov-on-Don, pp. 104–109.
13. Koleva, R., Kutiev, I.S., 1985. On the relative abundance of helium ions in the topside ionosphere. Advances in Space Research, 5(10), 37–40. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90178-4.
14. Kutiev, I.S., et al, 1994. Analytical expression of O^+–H^+ ion transition surface for use in IRI. Advances in Space Research, 14(12), 135–138. DOI: 10.1016/0273-1177(94)90254-2.
15. Arshinkov, I., et al, 1985. Intense current structures during low geomagnetic activity and their relation to small-scale magnetic perturbations seen by the Intercosmos Bulgaria-1300. Advances in Space Research, 5(4), 127–130. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90125-5.
16. Bankov, L., et al, 1986. Suprathermal electrons in small-scale field-aligned currents. Geophysical Research Letters, 13(2), 105–108. DOI: 10.1029/GL013i002p00105.

17. Bochev, A.Z., et al, 1987. Field-aligned currents and related phenomena in the cusp. Advances in Space Research, 7(8), 75–80. DOI: 10.1016/0273-1177(87)90192-X.
18. Dubinin, E.M., et al, 1985. Localized auroral disturbance in the morning sector of topside ionosphere as a standing electromagnetic wave. Planetary and Space Science, 33(6), 597–606. DOI: 10.1016/0032-0633(85)90045-5.
19. Chmyrev, V.M., et al, 1985. The fine structure of intensive small-scale electric and magnetic fields in the high-latitude ionosphere as observed by Intercosmos-Bulgaria 1300 satellite. Planetary and Space Science, 33(12), 1383–1388. DOI: 10.1016/0032-0633(85)90114-X.
20. Nenovski, P., et al, 1987. Quasi-periodical small-scale magnetic disturbances in the low-altitude cusp. Planetary and Space Science, 35(12), 1553–1559. DOI: 10.1016/0032-0633(87)90080-8.
21. Dachev, Ts.P., et al ,1985. Thermospheric heating at high latitudes as observed from Intercosmos-Bulgaria-1300 and Dynamics Explorer-B. Advances in Space Research, 5(4), 293–297. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90153-X.
22. Gogoshev, M.M., et al,1983. Bulgaria-1300 UV day glow spectra, related to the ozone problem. Advances in Space Research, 2(6), 97–104.
23. Gogoshev, M.M., et al, 1987. SAR-arcs and emissions in the main trough of the electron concentration. Advances in Space Research, 7(8), 15–19. DOI: 10.1016/0273-1177(87)90184-0.
24. Gogoshev, M.M., et al, 1987. Structure of the polar oval from simultaneous observations of the optical emissions and particle precipitations during the period of high solar activity 1981–1982. Advances in Space Research, 7(8), 7–10. DOI: 10.1016/0273-1177(87)90182-7.
25. Gerdjikova, M.G., Shepherd, G.G., 1987. Evaluation of auroral 5577-Å excitation processes using Intercosmos Bulgaria 1300 satellite measurements. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 92(A4), 3367–3374. DOI: 10.1029/JA092iA04p03367.
26. Kostadinov, I.N., et al, 1990. O I 630 nm emission in the equatorial ionosphere from “Intercosmos-Bulgaria-1300” data. Advances in Space Research, 10(11), 93–96. DOI: 10.1016/0273-1177(90)90312-N.
27. Stoeva, P., et al, 1993. Characteristics of a SAR arc registered by the EMO-5 filter and the spatial-scanning photometric system aboard the IC Bulgaria 1300 satellite on August 21, 1981. Advances in Space Research, 13(4), 131–134. DOI: 10.1016/0273-1177(93)90324-5.
28. Кутиев И., Р. Колева (1989), Структура электрического поля в ночной субавроральной ионосфере, Космич. Исслед., XXVII, вып. 5, с.709–716.
29. Balebanov, V.M., et al, 1985, Effects of small-scale plasma disturbance on the IKB-1300 spacecraft potential, Acta Astronautica, vol. 12, No. 5, 345–350, http://dx.doi.org/10.1016/0094-5765(85)90068-2
30. Antonova, E.E, et al, 1991. Parameters of multiple inverted-V structures inferred from Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite data, Geomagn. Aeron., Engl. Transl., vol. 31, pp. 258–267.
31. Nikolaeva, N.S., et al, 1988. Relationship between electric fields and field-aligned currents according to data from the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite. Kosmicheskie Issledovaniya, 26, 463–468
32. Podgorny, I.M., et al, 1988. Large-scale structure of the electric field and field-aligned currents in the auroral oval from the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite data. Geophysical Research Letters, 15(13), 1538–1540. DOI: 10.1029/GL015i013p01538.
33. Bankov, L.G., et al, 1996. A case study of subauroral ion drift velocity jets by means of Dynamics Explorer-2 and Intercosmos Bulgaria-1300 satellites data. Advances in Space Research, 17(10), 193–200. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00713.
34. Stepanova, M.V., et al, 2003. Study of electric field fluctuations using the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite data. Advances in Space Research, 31(5), 1425–1430. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00010-3.
35. Danov, D., et al, 2006. Scales of the field-aligned current structures in the high-latitude magnetosphere according to the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite data. Geomagnetism and Aeronomy, 46(4), 467–472. DOI: 10.1134/S0016793206040086.
36. Gdalevich, G.L. et al, 2006. Plasma irregularities in unstable outer ionosphere according to the Intercosmos-Bulgaria-1300 satellite data. Cosmic Research, 44(5), 419–424. DOI: 10.1134/S0010952506050054.
37. Danov, D. and R. Koleva (2007), Field-aligned currents on board of Intercosmos Bulgaria-1300 Satellite in comparison with modeled large scale currents, Sun and Geosphere, vol. 2, No. 1, pp. 39–42.
38. Danov, D., 2008. Field-aligned currents onboard the Intercosmos Bulgaria-1300 satellite in comparison with modeled FAC. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 70(2–4), 646–653. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.08.037.
39. Podgorny, I.M et al, 2017. Electric field generation in the magnetotail discovered by Intercosmos Bulgaria-1300. Sun and Geosphere, 12(2), 93–97.
40. Asenovski, S., et al, 2018. Determining the photocurrent of spherical probes from one-sonde-shading electric field data. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 167, 233–242. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.12.013.
41. Mishev, D. et al, 1985. Complex study of the atmospheric and ocean state, using data from the scientific equipment installed on “Meteor Priroda” satellite, Acta Astronautica, Vol.12, N7/8, pp. 469–474.

Session 1

Space Physics

Chairmen: Corr. Member Peter Velinov,
Assoc. Prof. Dr. Alexey Stoev

Secretary: Assoc. Prof. Daniela Boneva
Desislava Teneva

MODELING THE GROUND LEVEL ENHANCEMENT GLE 77 EVENT OF NOVEMBER 11, 2025, AND ITS EFFECTS ON THE EARTH'S ENVIRONMENT

Peter I. Y. I. Velinov, Krasimir Krastev, Radostin Pavlov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: PeterIYVelinov@gmail.com

Keywords: *Ground Level Enhancement (GLE 77), Galactic Cosmic Rays, Ionization*

Abstract: *GLE 77 of November 11, 2025, which is the largest GLE in the last 20 years, was quantitatively studied. Ionization profiles were obtained in the interval from 0 to 100 km in the Earth's atmosphere.*

МОДЕЛИРАНЕ НА СЪБИТИЕТО GLE 77 ОТ 11 НОЕМВРИ 2025 Г. И НЕГОВИТЕ ЕФЕКТИ ВЪРХУ ОКОЛОЗЕМНОТО КОСМИЧЕСКО ПРОСТРАНСТВО

Петър Велинов, Красимир Кръстев, Радостин Павлов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: PeterIYVelinov@gmail.com

Ключови думи: *Повишаване интензитета на космическите лъчи на земното ниво – ГЛЕ 77, Галактически Космически Лъчи, Йонизация*

Резюме: *Количествено е изследвано ГЛЕ 77 от 11 ноември 2025 г., което се явява най-голямото ГЛЕ за последните 20 години. Получени са профилите на йонизация в интервала от 0 до 100 km в земната атмосфера.*

Introduction

The Sun is a major source of space weather disturbances, producing energetic phenomena such as solar flares and coronal mass ejections (CMEs), which can accelerate charged particles to high energies. These particles, known as solar energetic particles (SEPs), propagate through interplanetary space and may reach the Earth, where their access to the atmosphere is influenced by the geomagnetic field. Once they enter the atmosphere, primary particles interact with atmospheric nuclei, producing extensive cascades of secondary particles and contributing to the ionization of the atmospheric medium.

Ground Level Enhancements (GLEs) are rare solar energetic particle events characterized by an increase in secondary particle fluxes detected by ground-based neutron monitors. These events provide valuable information about the acceleration and propagation of solar particles, as well as their interactions with the Earth's magnetosphere and atmosphere. The magnitude and geographical distribution of the atmospheric response depend on the energy spectrum and angular distribution of the incident particles, atmospheric density, and geomagnetic rigidity cutoff.

On 11 November 2025, a strong solar energetic particle event, designated GLE #77, was recorded by the worldwide neutron-monitor network. The event was associated with an X5.1-class solar flare and exhibited a complex, multi-component particle distribution. Observations indicated a substantial enhancement in neutron-monitor count rates and elevated radiation levels at high-latitude aviation altitudes. These characteristics make GLE #77 an important case for investigating the atmospheric response to an intense solar particle event. [1, 2]

Numerical simulations provide an effective means of investigating the development of atmospheric particle cascades and the energy deposition associated with energetic particle

precipitation. In particular, the GEANT4 Monte Carlo simulation toolkit enables the modeling of particle transport, electromagnetic and hadronic interactions, secondary particle production, and energy deposition in matter. When applied to an atmospheric model, GEANT4 can be used to investigate the production and transport of secondary particles and to estimate the altitude dependence of ionization under specified primary-particle and atmospheric conditions.

The geomagnetic rigidity cutoff is an important parameter governing the access of charged primary particles to the Earth's atmosphere. Particles with rigidities below the effective cutoff are generally excluded from direct access along the corresponding allowed trajectories, whereas particles with sufficiently high rigidities can penetrate the geomagnetic shielding. Consequently, variations in the rigidity cutoff can modify the primary particle population entering the atmosphere and, in turn, affect the altitude distribution and magnitude of atmospheric ionization. Comparing simulations for different geomagnetic cutoff conditions therefore provides a way to investigate the sensitivity of atmospheric ionization profiles to geomagnetic shielding.

The aim of this study is to investigate the atmospheric response to energetic cosmic-ray particles using GEANT4, with particular emphasis on the calculation and comparison of ionization profiles under different geomagnetic rigidity cutoff conditions. The study considers the transport and interactions of primary particles in the atmosphere and the production of secondary particles that contribute to atmospheric energy deposition and ionization. By examining the resulting altitude-dependent profiles for different cutoff conditions, this work seeks to characterize the influence of geomagnetic shielding on the atmospheric response to energetic particle precipitation and to provide a numerical framework that can support the interpretation of observations associated with GLE #77.

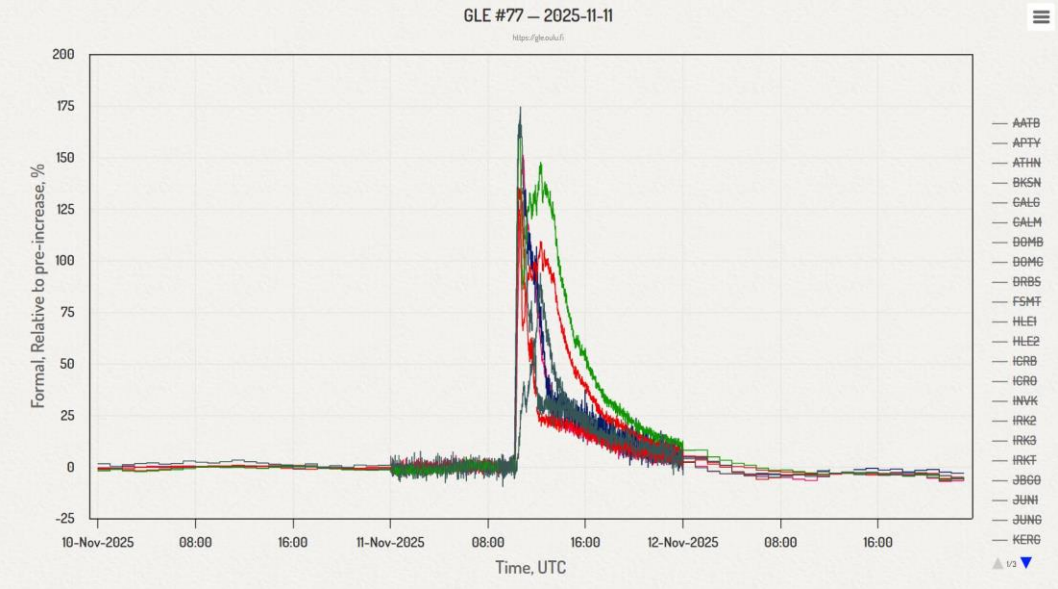


Fig. 1. The figure is taken from the worldwide neutron monitor database (https://gle.oulu.fi/#/)

Calculation methodology

The ion-pair production rate in the atmosphere was calculated by Monte Carlo simulation with the Geant4 toolkit (Agostinelli et al., 2003; Allison et al., 2016). The interactions of the primary particles and the development of the secondary cascades were modelled with the FTFP_BERT reference physics list, which combines the Fritiof string model at high energies with the Bertini intranuclear cascade at intermediate energies and is recommended for hadronic showers. The production threshold for secondary particles was set to 10 m, which is much shorter than the thickness of the scoring layers.

Atmospheric model. The geometry is centred on the centre of the Earth, which is a sphere of radius R_E = 6356.766 km. The atmosphere between 10 and 80 km altitude is represented by 35 concentric spherical shells, each 2 km thick. Each shell is filled with dry air (mass fractions N 0.755, O 0.232, Ar 0.013). Its density, temperature and pressure are taken from the U.S. Standard Atmosphere 1976 at the mid-altitude of the shell, after converting geometric altitude to geopotential altitude. The region between 80 and 100 km is treated as vacuum. All particles that reach altitudes below 10 km are stopped, because the ionization is not scored there.

Primary spectrum. The differential intensity of the galactic cosmic ray protons at the top of the atmosphere is described by the force-field approximation with the local interstellar spectrum of Castagnoli and Lal (1980):

(1) $J(T) = A \cdot T(T + 2m_p)(T + x + \varphi)^{(-\gamma)} / [(T + \varphi)(T + 2m_p + \varphi)]$, $x = a \cdot \exp(-bT)$,

where T is the kinetic energy in MeV, m_p is the proton rest energy, $\varphi = 530$ MV is the solar modulation potential, $A = 9.9 \times 10^8$, $a = 780$, $b = 2.4 \times 10^{-4}$ and $\gamma = 2.65$. Geomagnetic shielding is taken into account by a sharp vertical cutoff. The lower energy limit equals the kinetic energy that corresponds to the cutoff rigidity R_c:

(2) $T_c = [(R_c)^2 + m_p^2]^{(1/2)} - m_p$,

and the upper energy limit is 10 TeV.

Event generation and weighting. To sample the wide energy range efficiently, primary energies are drawn from a log-uniform distribution, $q(T) = 1/[T \cdot \ln(T_{max}/T_{min})]$. Each event receives the physical weight

(3) $w = \pi \cdot J(T) / q(T)$ [particles m^{-2} s^{-1}],

which is the flux through a unit area of the source sphere integrated over the inward hemisphere. All primaries start from one point on the sphere at 100 km altitude. Their directions follow the cosine law for an isotropic flux crossing a surface, with $\mu = \cos\theta = \xi^{(1/2)}$, where ξ is a uniform random number. The energy deposited in each step is assigned to the whole spherical shell in which the step occurred. Because the problem is spherically symmetric, this is equivalent to an isotropic source distributed uniformly over the whole sphere with scoring at a single location, and every simulated event contributes to all shells.

Ionization rate. The weighted mean energy deposit $\langle wE_i \rangle$ in shell i is converted to the ion-pair production rate as

(4) $q_i = \langle wE_i \rangle / [W \cdot (V_i/A_s)]$, $V_i/A_s = (r_1^3 - r_0^3)/(3R_s^2)$,

where $W = 34$ eV is the mean energy required to produce one ion pair in air, r_0 and r_1 are the inner and outer radii of the shell, and R_s is the radius of the source sphere. The statistical uncertainty of q_i is estimated as the standard error of the weighted mean,

(5) $\sigma_i = [(\langle (wE_i)^2 \rangle - \langle wE_i \rangle^2)/(N - 1)]^{(1/2)}$,

where N is the number of simulated events. Independent runs with different random seeds can be combined to reduce the uncertainty. The simulation runs in multithreaded mode, and the results of all threads are merged before normalization.

Atmospheric ionization by galactic cosmic rays via GEANT4

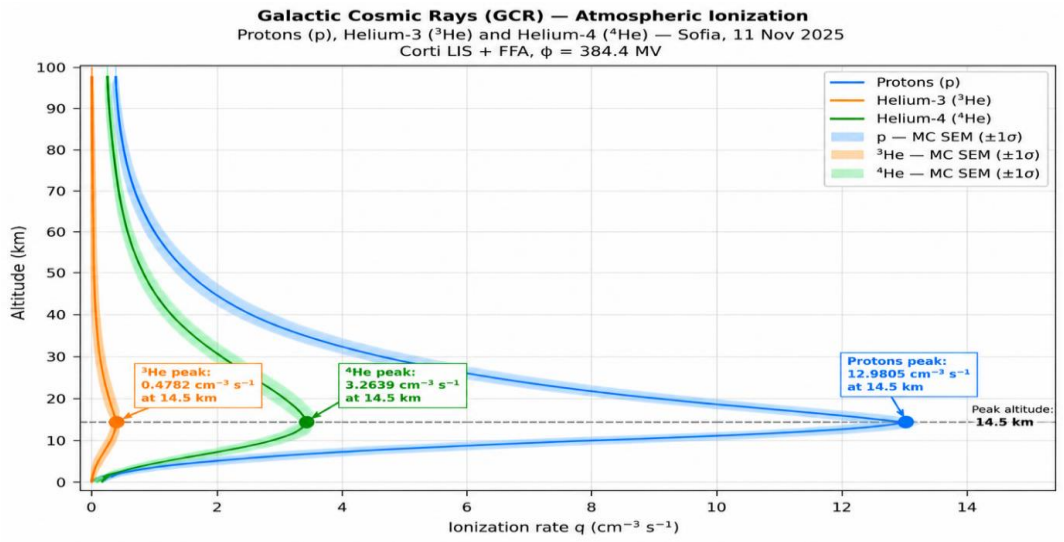


Fig. 2.

The atmospheric ionization induced by GLE 77 solar protons was computed with a Monte Carlo model based on the GEANT4 toolkit (version 11.4.2; Agostinelli et al., 2003; Allison et al., 2016) and the FTFP_BERT physics list. The atmosphere is represented by 100 concentric spherical shells of 1 km thickness between 0 and 100 km above a spherical Earth (R = 6371.2 km). The density, temperature and composition of each shell are taken from the NRLMSIS 2.1 empirical model for 11 November 2025, 10:30 UT, at the location of Sofia (42.70° N, 23.32° E) [ref. NRLMSIS 2.1]. The geomagnetic field inside the simulation domain is described by the IGRF-14 model for epoch 2025.86 [ref. IGRF-14].

For each primary energy, protons are injected at 100 km altitude with an isotropic (cosine-law) angular distribution over the downward hemisphere, and the full secondary cascade is followed. The energy deposited in each shell is converted into the number of ion pairs using a mean energy of W = 33.85 eV per ion pair in air, which gives the ionization yield function Y(E, h) per incident primary. The yield was calculated on a logarithmic grid of [17] kinetic energies between the cutoff energy and 30 GeV, with [N] simulated cascades per energy. The ion pair production rate is then obtained as

(6) $q(h) = \int_{E_c}^{E_{max}} \pi J(E) Y(E, h) dE,$

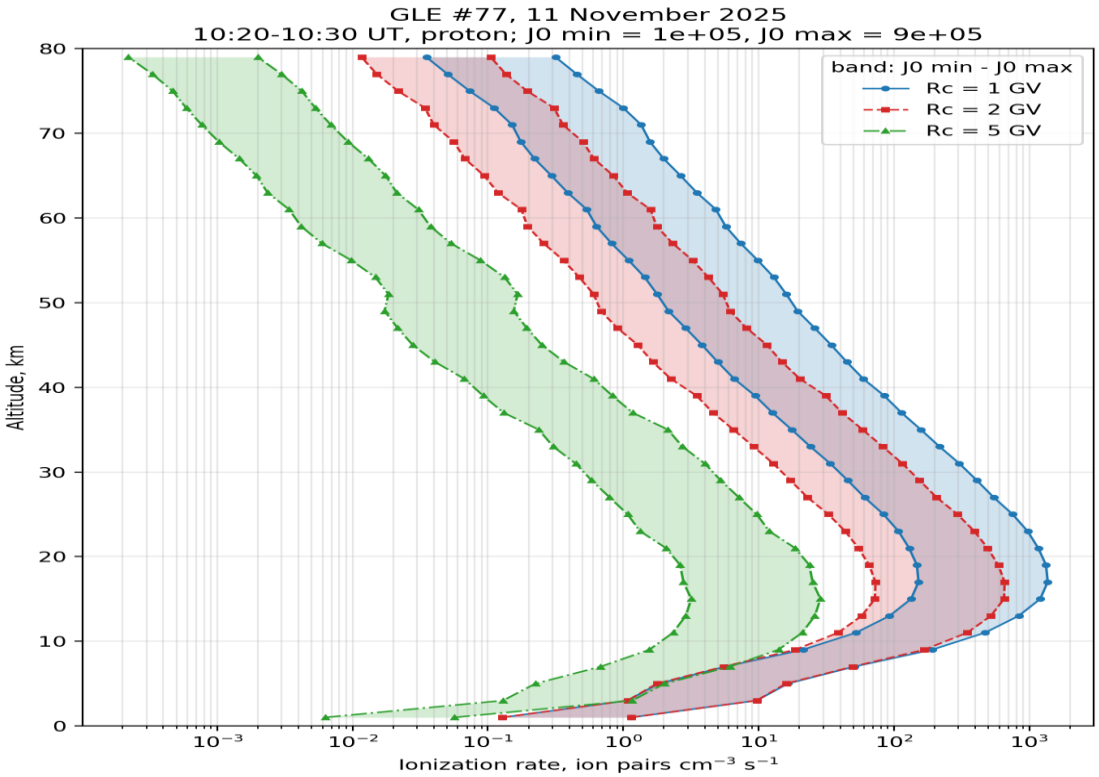
where J(E) is the differential intensity of solar protons above the atmosphere and E_c is the kinetic energy corresponding to the geomagnetic cutoff rigidity R_c. Assuming a sharp vertical cutoff, the yield function does not depend on R_c, so one set of simulations serves all cutoffs. Results are presented for R_c = 1, 2 and 5 GV, averaged over 2-km altitude bins from 0 to 80 km.

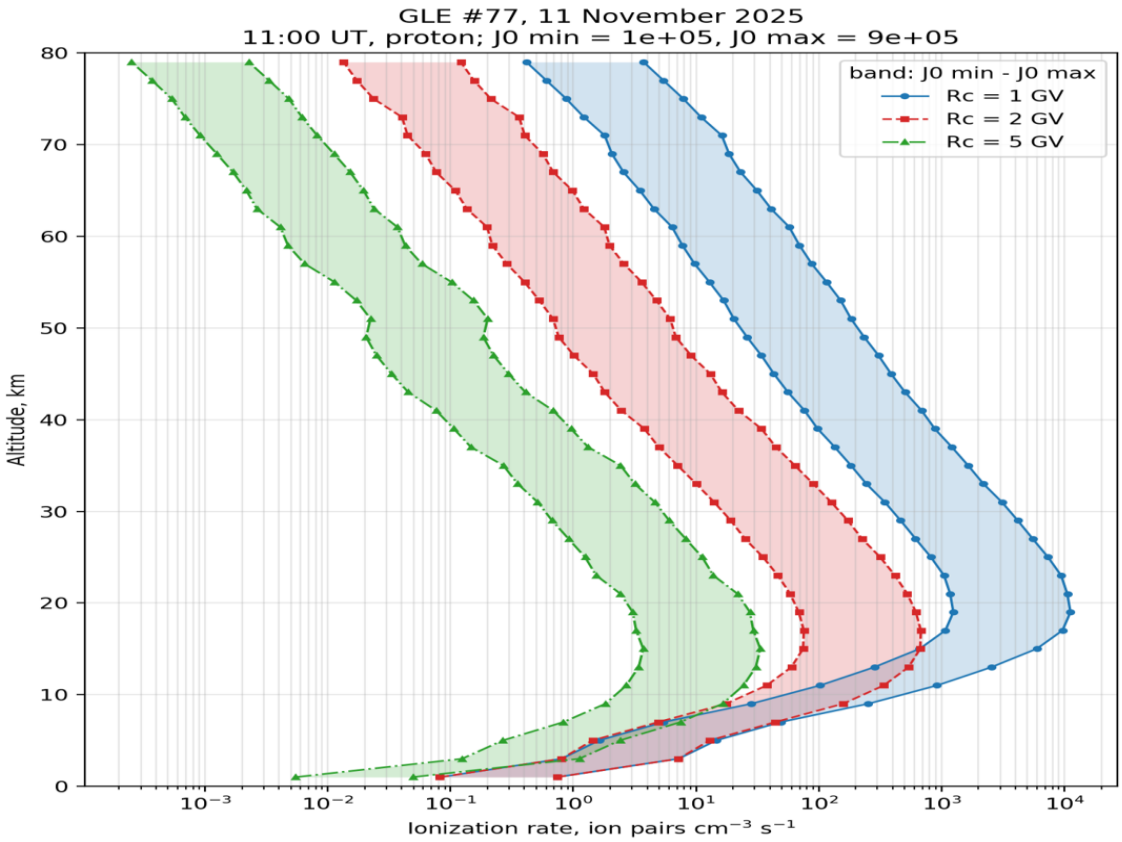
The spectral shapes of the solar protons were taken from the neutron-monitor analysis of Balabin et al. (2026): an exponential spectrum $J = J_0 \exp(-E/E_0)$ with E_0 = 0.73 GeV at 10:20–10:30 UT, a power law $J = J_0 E^{(-\gamma)}$ with γ = 4.2 at 11:00 UT, and exponential spectra with E_0 = 0.63 GeV at 11:30 UT and E_0 = 0.42 GeV at 15:00 UT. Because the normalization is uncertain, the calculations were performed for J_0 between 1×10^5 and 9×10^5 m^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1}, and the results are presented as the corresponding range of q.

The calculated profiles show a maximum at 15–19 km altitude. At 10:20–10:30 UT the maximum ionization rate is 1.5×10^2–1.4×10^3 cm^{-3} s^{-1} for R_c = 1 GV, 73–660 cm^{-3} s^{-1} for R_c = 2 GV and 3.2–29 cm^{-3} s^{-1} for R_c = 5 GV. The highest values are obtained at 11:00 UT for R_c = 1 GV (1.3×10^3–1.1×10^4 cm^{-3} s^{-1}), reflecting the large contribution of protons with rigidities between 1 and 2 GV in the power-law spectrum. As the spectrum softens, the ionization decreases, most strongly for high cutoffs: between 11:00 and 15:00 UT the maximum ionization rate for R_c = 5 GV decreases by about two orders of magnitude, to 0.03–0.24 cm^{-3} s^{-1}. Below about 7 km the profiles for R_c = 1 and 2 GV coincide, since only cascades of protons with rigidities above 2 GV reach these altitudes. The Monte Carlo statistical uncertainty is 1–5% around the ionization maximum. The calculations assume an isotropic proton flux and a sharp vertical cutoff and neglect the anisotropy of the event, the geomagnetic penumbra and the contribution of heavier nuclei. The results therefore represent an estimate of the ionization effect of GLE 77 at different geomagnetic latitudes.

Atmospheric ionization by solar cosmic rays via GEANT4

The figures below show the ionization profiles at 11:00 UT, when the solar proton spectrum is described by a power law with γ = 4.2. Compared with 10:20–10:30 UT, the change of the spectral shape affects the three cutoffs very differently. For R_c = 2 and 5 GV the profiles remain nearly unchanged: the maximum ionization rate is 75–680 cm^{-3} s^{-1} and 3.7–33 cm^{-3} s^{-1}, respectively, within about 15% of the values at 10:20–10:30 UT. In contrast, for R_c = 1 GV the ionization increases by a factor of about 8, reaching 1.3×10^3–1.1×10^4 cm^{-3} s^{-1}, and the maximum shifts upwards to about 19 km. This increase is caused by the steep rise of the power-law spectrum towards low energies, which strongly enhances the contribution of protons with rigidities between 1 and 2 GV (kinetic energies of 0.43–1.27 GeV). These protons are stopped mainly above the ionization maximum, and their effect is therefore most pronounced in the upper stratosphere and mesosphere. At 79 km the ionization rate for R_c = 1 GV is about 30 times higher than for R_c = 2 GV, compared with a factor of about 3 at 10:20–10:30 UT. As a result, at 11:00 UT the ionization effect of the event is concentrated at high geomagnetic latitudes, while at mid-latitudes it remains comparable to that in the initial phase. Since the lower boundary of the 1 GV integration (0.43 GeV) is close to the lower limit of the energy range in which the spectrum was derived (0.4 GeV), the results for R_c = 1 GV at this time are the most sensitive to the assumed spectral shape.


GLE #77, 11 November 2025
10:20-10:30 UT, proton; J0 min = 1e+05, J0 max = 9e+05
band: J0 min - J0 max
Rc = 1 GV
Rc = 2 GV
Rc = 5 GV
Altitude, km
Ionization rate, ion pairs cm⁻³ s⁻¹


GLE #77, 11 November 2025
11:00 UT, proton; J0 min = 1e+05, J0 max = 9e+05
band: J0 min - J0 max
Rc = 1 GV
Rc = 2 GV
Rc = 5 GV
Altitude, km
Ionization rate, ion pairs cm⁻³ s⁻¹

Conclusion

The atmospheric ionization caused by the solar protons of GLE 77 on 11 November 2025 was calculated with a GEANT4 Monte Carlo model of the atmosphere for four phases of the event and for geomagnetic cutoff rigidities of 1, 2 and 5 GV, corresponding to high, high-middle and middle geomagnetic latitudes. The main results can be summarized as follows.

1. In all phases of the event the ionization profiles have a maximum in the lower stratosphere, at 15–19 km, slightly above the Regener–Pfotzer maximum of the galactic cosmic ray ionization (13.5–14.5 km), owing to the softer spectrum of the solar protons.
2. The ionization effect depends strongly on the geomagnetic cutoff. At R_c = 1 GV the maximum ion pair production rate reaches 10^2–10^4 cm^{-3} s^{-1} and exceeds the galactic cosmic ray background many times. At R_c = 5 GV it is 3–33 cm^{-3} s^{-1} in the first hour of the event, comparable to the galactic cosmic ray ionization calculated for Sofia ([~17] cm^{-3} s^{-1}).
3. The temporal evolution of the spectrum controls the latitudinal distribution of the effect. The power-law spectrum at 11:00 UT produces the strongest ionization at high latitudes, while the progressive softening of the spectrum after 11:30 UT reduces the ionization at middle latitudes by about two orders of magnitude. In the late phase (15:00 UT) the direct ionization effect of the solar protons at middle latitudes is negligible compared with the galactic cosmic ray background, while at high latitudes it remains significant.
4. The cutoff dependence of the results follows closely the variation of the primary proton flux above the cutoff energy, which confirms that the spectral shape and its time evolution are the main factors determining the ionization effect of the event.

The results are subject to the uncertainty of the spectral normalization, which was taken into account as a range of J_0, and to the assumptions of an isotropic flux, a sharp cutoff rigidity and a purely proton composition. A more accurate estimate requires the time-resolved normalization of the spectrum, the anisotropy of the event and the contribution of helium and heavier nuclei. The developed computational framework can be applied to other GLE events and, combined with chemistry-climate models, used to assess the impact of intense solar particle events on the composition of the middle atmosphere.

References:

1. A.L. Mishev, B. Heber, K.L. Klein (2026). Ground level enhancement GLE #77 on 11 November 2025: a data summary. *Advances in Space Research*. https://doi.org/10.1016/j.asr.2026.03.023
2. Balabin, Yu. V., Gvozdevskiy, B. B., & Germanenko, A. V. (2026). GLE77 event of November 11, 2025. *Geomagnetism and Aeronomy*, 66(3), 499–514. https://doi.org/10.7868/S3034502226030038
3. Sato, T., et al. (2026). Estimation of global increase of radiation dose rates during the ground level enhancement on 11–12 November 2025 using WASAVIES. *Space Weather*. https://doi.org/10.1029/2026SW004949
4. Mishev, A. L., & Velinov, P. I. Y. (2018). Ion production and ionization effect in the atmosphere during the Bastille day GLE 59 due to high energy SEPs. *Advances in Space Research*, 61(1), 316–325. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.023
5. Pätsi, S., & Mishev, A. (2022). Ionization effect in the Earth's atmosphere due to cosmic rays during the GLE #71 on 17 May 2012. *Advances in Space Research*, 69(7), 2893–2901. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.008

IONIZATION MODEL CORIMIA WITH 3+1 INTERVAL APPROXIMATION FOR COSMIC RAYS

Peter I. Y. I. Velinov, Simeon Asenovski, Radostin Pavlov, Lachezar Mateev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: peteriyvelinov@gmail.com

Keywords: *Cosmic Ray Ionization, CORIMIA Model, Three-Interval Approximation, Energy Loss Function, Proton Ionization, Atmospheric Ionization*

Abstract: *The CORIMIA ionization model is used to describe the process of ionization in the Earth's atmosphere caused by cosmic ray particles. In this study, a three plus one interval approximation of the ionization loss function dE/dh is presented for cosmic rays. The approach extends the previous two interval model by introducing a third interval for higher particle energies (Ek > 5 GeV), improving the accuracy of ionization rate calculations in the upper atmospheric regions. Analytical expressions are derived for the energy loss laws and the corresponding atmospheric cut-off parameters in each interval. The obtained formulation allows a more detailed estimation of the ionization yield and contributes to a better representation of the energy dependent behavior of cosmic rays.*

ЙОНИЗАЦИОНЕН МОДЕЛ CORIMIA С 3 + 1 ИНТЕРВАЛНА АПРОКСИМАЦИЯ ЗА КОСМИЧЕСКИ ЛЪЧИ

Петър И. Велинов, Симеон Асеновски, Радостин Павлов, Лъчезар Матев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: peteriyvelinov@gmail.com

Ключови думи: *йонизация от космически лъчи, Модел CORIMIA, три-интервална аппроксимация, функция на енергийните загуби, йонизация от протони, атмосферна йонизация*

Резюме: *Йонизационният Модел CORIMIA се използва за описание на процеса на йонизация в земната атмосфера, предизвикан от космическите лъчи. В настоящото изследване е представена три плюс един интервална аппроксимация на функцията на йонизационните загуби dE/dh за космически лъчи протони със заряд Z = 1. Подходът разширява предишния дву-интервален модел чрез въвеждане на трети интервал за по-високи енергии на частиците (Ek > 5 GeV), като по този начин се повишава точността при изчисленията на скоростта на йонизация в горните атмосферни слоеве. Изведени са аналитични изрази за законите на енергийните загуби и съответните атмосферни прагове на отрязване за всеки интервал. Получената формулировка позволява по-прецизна оценка на йонизационния добив и по-добро представяне на енергийнозависимото поведение на космическите лъчи.*

Introduction of three interval approximation of the ionization loss function for particles with z > 1

The equation describing the ionization losses in the case of the three-interval approximation for particles with charge Z has the form:

(1)
$$-\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dh} = \begin{cases} 1613.3E^{1/4} & 0.15 \le E \le E_a \quad \text{INTERVAL } 1^* \\ 242Z^2E^{-3/4} & E_a < E \le 600 \text{ MeV} \quad \text{INTERVAL } 1 \\ 2Z^2 & 600 < E \le 5000 \text{ MeV} \quad \text{INTERVAL } 2 \\ 0.7Z^2E^{0.123} & 5 < E \le 5000 \text{ GeV} \quad \text{INTERVAL } 3. \end{cases}$$

In addition to the three intervals, Interval $1*$ is also introduced, which describes the decrease in the charge of the incoming particle. The upper limit of this interval is given by the expression:

(2) $$E_a = 0.15 \times Z^2.$$

The first two intervals, as well as the charge reduction interval in equation (1), are identical to the two-interval approximation, i.e. we have no change in the slope of the curve describing the ionization losses. Therefore, in describing the model for the three-interval approximation, we will use some of the formulas of the previous case.

The first step that needs to be taken is to derive the energy loss laws for the individual intervals. For Interval $1*$, 1 and 2 we have respectively:

(3) $$E_{1^*}(h) = \left(E_k^{3/4} - \frac{1210}{A}\tilde{h}\right)^{4/3}.$$

(4) $$E_1(h) = \left(E_k^{7/4} - \frac{423.75Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{4/7}.$$

(5) $$E_2(h) = E_k - \frac{2Z^2}{A}\tilde{h}.$$

The energy loss law describing Interval 3 will be found using the amount of substance passed:

(6) $$\tilde{h} = \tilde{h}_3 = \frac{A}{0.7Z^2}\int_{E(h)}^{E_k}\frac{dE}{E^{0.123}} = \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_k^{0.877} - E_3^{0.877}(h)\right).$$

From equation (6) we obtain:

(7) $$E_3(h) = \left(E_k^{0.877} - \frac{0.61Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{1.14}.$$

The atmospheric cutoff thresholds for the individual intervals should be expressed. Using the calculations we have:

(8) $$E_{A1^*}(h) = \left(0.15^{3/4} + \frac{1210}{A}\tilde{h}\right)^{4/3} \leq E_a.$$

(9) $$E_{A1}(h) = \left(423.74\frac{Z^2}{A}\tilde{h} - 0.35Z^2(E_a^{3/4} - 0.15^{3/4}) + E_a^{7/4}\right)^{4/7}.$$

(10) $$E_{A2}(h) = 2\frac{Z^2}{A}\tilde{h} - 0.002Z^2(E_a^{3/4} - 0.15^{3/4}) - 0.005(600^{7/4} - E_a^{7/4}) + 600.$$

The atmospheric cutoff threshold for Interval 3 can be expressed as follows:

(11) $$\begin{aligned}\tilde{h} = \tilde{h}_{1^*} + \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 &= \frac{A}{1613.3}\int_{E_{0.15}}^{E_a}\frac{dE}{E^{1/4}} + \frac{A}{242Z^2}\int_{E_a}^{600}\frac{dE}{E^{-3/4}} + \\ &+ \frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{5000}dE + \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_{A3}(h)}\frac{dE}{E^{0.123}}dE = \\ &= \frac{A}{1210}\left(E_a^{3/4} - 0.15^{3/4}\right) + \frac{A}{423.75Z^2}\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) + \\ &+ \frac{A}{2Z^2}(5000 - 600) + \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_{A3}^{0.877}(h) - 5000^{0.877}\right).\end{aligned}$$

from where we get:

(12) $$\begin{aligned}E_{A3}(h) = \Big(&\frac{0.61Z^2}{A}\tilde{h} + 5000^{0.877} - 5\times10^{-4}Z^2\left(E_a^{3/4} - 0.15^{3/4}\right) - \\ &- 0.0014\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) - 0.3\,(5000 - 600)\Big)^{1.14}.\end{aligned}$$

The significance of the atmospheric cutoff thresholds for the different intervals is important for determining the effective cutoff threshold.

An important step in describing the model is to derive the energy loss laws for cases where the energy of the incoming particle crosses one or more interval boundaries. When the energy of a particle with initial energy in Interval 1 crosses the boundary Ea, the energy loss law is given by the expression:

(13) $$E_{11^*}(h) = \left(\frac{2.85}{Z^2}(E_k^{7/4} - E_a^{7/4}) - \frac{1210}{A}\tilde{h} + E_a^{3/4}\right)^{4/3}.$$

In the case where the energy of the incoming particle is in Interval 2 and crosses the 600 MeV limit, we have (equation 4.45)):

(14) $$E_{21}(h) = \left(211.88(E_k - 600) - \frac{423.75Z^2}{A}\tilde{h} + 600^{7/4}\right)^{4/7}.$$

The law of energy loss when crossing the 5000 MeV limit can similarly be derived using the amount of substance passed:

(15) $$\tilde{h} = \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 = \frac{A}{2Z^2}\int_{E_{32}}^{5000} dE + \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_k}\frac{dE}{E^{0.123}}dE =$$

$$= \frac{A}{2Z^2}\left(5000 - E_{32}(h)\right) + \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right).$$

Finally for E32(h) we obtain:

(16) $$E_{32}(h) = 5000 - \frac{2Z^2}{A}\tilde{h} + 2.86\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right).$$

When the energy of the particle crosses two boundaries, we have two possibilities. If the initial energy of the particle is in Interval 2 and when passing through the atmosphere the energy crosses the boundaries of 600 MeV and Ea, the energy loss law is given by equation:

(17) $$E_{21^*}(h) = \left(E_a^{3/4} + \frac{2.85}{Z^2}(600^{7/4} - E_a^{7/4}) + \frac{605}{Z^2}(E_k - 600) - \frac{1210}{A}\tilde{h}\right)^{4/3}.$$

The second possibility is when the initial energy of the incoming particle Ek is in Interval 3, and subsequently the kinetic and energy crosses the boundaries of 5000 MeV and 600 MeV. For the amount of substance passed in this case we have:

(18) $$\tilde{h} = \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 = \frac{A}{242Z^2}\int_{E_{31}}^{600}\frac{dE}{E^{-3/4}} + \frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{5000} dE + \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_k}\frac{dE}{E^{0.123}}dE =$$

$$= \frac{A}{423.75Z^2}\left(600^{7/4} - E_{31}^{7/4}\right) + \frac{A}{2Z^2}\left(5000 - 600\right) + \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right).$$

From equation (18) we can express the energy loss law E31(h):

(19) $$E_{31}(h) = \left(600^{7/4} + 211.88\left(5000 - 600\right) + 694.67\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right) - \frac{423.11Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{4/7}.$$

There is one possibility where the kinetic energy of the incoming particle can cross the boundaries of all intervals. In this case, we can write:

(20) $$\tilde{h} = \tilde{h}_{1^*} + \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 = \frac{A}{1613.3}\int_{E_{31^*}}^{E_a}\frac{dE}{E^{1/4}} + \frac{A}{242Z^2}\int_{E_a}^{600}\frac{dE}{E^{-3/4}} +$$

$$+\frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{5000} dE + \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_k}\frac{dE}{E^{0.123}}dE =$$

$$= \frac{A}{1210}\left(E_a^{3/4} - E_{31^*}^{3/4}\right) + \frac{A}{423.75Z^2}\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) +$$

$$+\frac{A}{2Z^2}\left(5000 - 600\right) + \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right).$$

The energy loss law in the case of crossing 3 interval boundaries has the form:

(21) $$E_{31^*}(h) = \left(E_a^{3/4} - \frac{1210}{A}\tilde{h} + \frac{2.85}{Z^2}\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{605}{Z^2}(5000 - 600) + \frac{1983.6}{Z^2}\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right)\right)^{4/3}.$$

To express the explicit form of the model for calculating the electron production, it is necessary to find the ionization loss function for the individual intervals and in cases where there is a crossing of energy boundaries by the kinetic energy of the incoming particle. For this purpose, we will use the laws for energy losses and as well as the laws for energy losses in cases of crossing of boundaries of intervals:

(22) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{1^*} = 1613.3E_{1^*}^{1/4} = 1613.3\left(E_k^{3/4} - \frac{1210}{A}\tilde{h}\right)^{1/3},$$

(23) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{1} = 242Z^2E_1^{-3/4} = 242Z^2\left(E_k^{7/4} - \frac{423.75Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{-3/7},$$

(24) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{2} = \frac{2Z^2}{A},$$

(25) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{11^*} = 1613.3E_{11^*}^{1/4} = 1613.3\left(\frac{2.85}{Z^2}(E_k^{7/4} - E_a^{7/4}) - \frac{1210}{A}\tilde{h} + E_a^{3/4}\right)^{1/3},$$

(26) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{21} = 242Z^2E_{21}^{-3/4} = 242Z^2\left(211.88(E_k - 600) - \frac{423.75Z^2}{A}\tilde{h} + 600^{7/4}\right)^{-3/7},$$

(27) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{21^*} = 1613.3E_{21^*}^{1/4} = 1613.3\left(\frac{2.85}{Z^2}(600^{7/4} - E_a^{7/4}) - \frac{605}{Z^2}(E_k - 600) - \frac{1210}{A}\tilde{h} + E_a^{3/4}\right)^{1/3},$$

(28) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{3} = 0.7Z^2E_3^{0.123}(h) = 0.7Z^2\left(E_k^{0.877} - \frac{0.61Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{0.14},$$

(29) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{32} = \frac{2Z^2}{A},$$

(30) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{31} = 242Z^2E_{31}^{-3/4} =$$

$$= 242Z^2\left(600^{7/4} + 211.88\,(5000 - 600) + 694.67\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right) - \frac{423.11Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{-3/7},$$

(31) $$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dh}\right)_{31^*} = 1613.3E_{31^*}^{1/4} = 1613.3\left(E_a^{3/4} - \frac{1210}{A}\tilde{h} + \frac{2.85}{Z^2}\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{605}{Z^2}(5000 - 600) + \frac{1983.6}{Z^2}\left(E_k^{0.877} - 5000^{0.877}\right)\right)^{1/3}.$$

Before we can express the electron production, we need to find the energies of infinity (the initial kinetic energy before the particle enters the Earth's atmosphere) for the boundaries of the individual intervals. Again, we will use the amount of matter passed. For the boundary Ea = 0.15 × Z2, three cases are possible depending on the magnitude of the energy of infinity. The first case is when the energy of infinity is in Interval 1. Then we have:

(32) $$\tilde{h} = \tilde{h}_1 = \frac{A}{242Z^2}\int_{E_a}^{E_{a,1}}\frac{dE}{E^{-3/4}} = \frac{A}{423.75Z^2}\left(E_{a,1}^{7/4} - E_a^{7/4}\right) \Rightarrow$$

(33) $$E_{a,1} = \left(E_a^{7/4} + \frac{423.75Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{4/7}.$$

When the particle's energy at infinity is in Interval 2 we get:

(34) $$\tilde{h} = \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2 = \frac{A}{242Z^2}\int_{E_a}^{600}\frac{dE}{E^{-3/4}} + \frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{E_{a,2}} dE =$$

$$= \frac{A}{423.75Z^2}\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) + \frac{A}{2Z^2}\left(E_{a,2} - 600\right) \Rightarrow$$

(35) $$E_{a,2} = 600 + \frac{2Z^2}{A}\tilde{h} - 211.88\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right).$$

For the last case, when the energy of infinity for the boundary Ea is in Interval 3, we have:

(36) $$\tilde{h} = \tilde{h}_1 + \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 = \frac{A}{242Z^2}\int_{E_a}^{600}\frac{dE}{E^{-3/4}} + \frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{5000} dE + \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_{a,3}}\frac{dE}{E^{0.123}} =$$

$$= \frac{A}{423.75Z^2}\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) + \frac{A}{2Z^2}\left(5000 - 600\right) + \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_{a,3}^{0.877} - 5000^{0.877}\right) \Rightarrow$$

(37) $$E_{a,3} = \left(5000^{0.877} + \frac{0.61Z^2}{A}\tilde{h} - 0.0014\left(600^{7/4} - E_a^{7/4}\right) - 0.305(5000 - 600)\right)^{1.14}$$

There are two possible cases for the energy of infinity at the 600 MeV limit. The first is when the energy of infinity is in Interval 2, in which case we get:

(38) $$\tilde{h} = \tilde{h}_2 = \frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{E_{600,2}} dE = \frac{A}{2Z^2}\left(E_{600,2} - 600\right) \Rightarrow$$

(39) $$E_{600,2} = 600 + \frac{2Z^2}{A}\tilde{h}.$$

The second case is when the energy of infinity is in Interval 3:

(40) $$\tilde{h} = \tilde{h}_2 + \tilde{h}_3 = \frac{A}{2Z^2}\int_{600}^{5000} dE + \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_{600,3}}\frac{dE}{E^{0.123}} =$$

$$= \frac{A}{2Z^2}\left(5000 - 600\right) + \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_{600,3}^{0.877} - 5000^{0.877}\right) \Rightarrow$$

(41) $$E_{600,3} = \left(5000^{0.877} + \frac{0.61Z^2}{A}\tilde{h} - 0.305(5000 - 600)\right)^{1.14}.$$

For the 5000 MeV limit, the energy at infinity can only be in Interval 3, in which case we have:

(42) $$\tilde{h} = \tilde{h}_3 = \frac{A}{0.7Z^2}\int_{5000}^{E_{5000,3}}\frac{dE}{E^{0.123}} = \frac{A}{0.61Z^2}\left(E_{5000,3}^{0.877} - 5000^{0.877}\right) \Rightarrow$$

(43) $$E_{5000,3} = \left(5000^{0.877} + \frac{0.61Z^2}{A}\tilde{h}\right)^{1.14}.$$

After the calculations, we can construct the model for calculating the electron production due to the passage of charged cosmic rays with charge Z in a three-interval approximation of the ionization loss function. Depending on the size of the effective cutoff threshold Eeff, as well as the energies of infinity for the individual boundaries, several cases are possible for the electron production q(h).

Conclusions

The 3+1 interval approximation developed within the CORIMIA ionization model represents a significant refinement in the analytical treatment of cosmic ray–induced ionization. Compared with the earlier two-interval formulation, the inclusion of a high-energy domain (above 5 GeV) provides:

- improved continuity of the ionization loss function across energy boundaries,
- more realistic representation of relativistic energy losses,
- and enhanced accuracy of the ion production rate in the upper atmosphere.

The analytical expressions derived for Ei(h) and Eij(h) yield compact formulas for the atmospheric cut-off energies and penetration depths.

References:

1. Bazilevskaya, G.A., Usoskin, I.G., Flückiger, E.O. et al. (2008). Cosmic ray induced ion production in the atmosphere. Space Science Reviews, 137, 149–173.
2. Usoskin, I.G., Kovaltsov, G.A. (2006). Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications. Journal of Geophysical Research, 111, D21206.
3. Velinov, P.I.Y., Asenovski, S., Mateev, L., Mishev, A. (2013). Improved COsmic Ray Ionization Model for Atmosphere and Ionosphere (CORIMIA) with account of Monte Carlo Simulations. Journal of Physics: Conference Series, 409, 012212. https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012212
4. Velinov, P.I.Y., Asenovski, S., Mateev, L. (2013). Ionization of Solar Cosmic Rays in Ionosphere and Middle Atmosphere Simulated by CORIMIA Programme. Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences, 66(2), 235–242.
5. Moraal, H., McCracken, K.G. (2012). The time structure of ground level enhancements in solar cycle 23. Space Science Reviews, 171, 85–95.
6. O'Brien, K. Cosmic-ray propagation in the atmosphere. Nuov Cim A 3, 521–547 (1971). https://doi.org/10.1007/BF02823324
7. Bethe, H. (1930). Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie. Annalen der Physik, 397, 325–400.
8. Velinov, P.I.Y., Asenovski, S., Mateev, L., Mishev, A., Tonev, P.T. (2013). Numerical calculation of cosmic ray ionization rate profiles in the middle atmosphere and lower ionosphere with relation to characteristic energy intervals. Acta Geophysica, 61, 494–509.

OVERVIEW OF THE LOW EARTH RADIATION ENVIRONMENT VARIATIONS ON "MIR" AND INTERNATIONAL SPACE STATION OBSERVED BY LIULIN TYPE INSTRUMENTS IN 1991–2022

Tsvetan Dachev[1], Borislav Tomov[1], Malina Jordanova[1], Jordanka Semkova[1], Krasimir Krastev[1], Donat-Peter Häder[2], Viacheslav Shurshakov[3], Victor Benghin[3], William Tobiska[4], Brad Gersey[4], Benjamin Hogan[4]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria
[2]Neue Str. 9, 91096 Möhrendorf, Germany
[3]State Research Centre Institute of Biomedical Problems, Russian Academy of Science, Moscow, Russia
[4]Space Weather Division, Space Environment Technologies, Los Angeles, CA, USA
e-mail: tdachev59@gmail.com

Keywords: *Space radiation, ISS, GCR, Inner and Outer radiation belt*

Abstract: *The space weather and the connected with it ionizing radiation are among the main health concerns to the space station crews. Estimation the effects of radiation on humans on the International space station (ISS) requires at accurate knowledge of the accumulated by different radiation sources absorbed dose rates. The latter depend on the global space radiation component distribution and the local variations generated by the 3D surrounding shielding distribution.*

ОБЗОР НА ВАРИАЦИИТЕ НА РАДИАЦИОННАТА СРЕДА В НИСКА ОКОЛОЗЕМНА ОРБИТА НА СТАНЦИИТЕ „МИР" И МКС, РЕГИСТРИРАНИ С ИНСТРУМЕНТИ ОТ ТИПА „ЛЮЛИН" В ПЕРИОДА 1991–2022 Г.

Цветан Дачев[1], Борислав Томов[1], Малина Йорданова[1], Йорданка Семкова[1], Красимир Кръстев[1], Донат-Петер Хедер[2], Вячеслав Шуршаков[3], Виктор Бенгин[3], Уилям Тобиска[4], Брад Герси[4], Бенджамин Хоган[4]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките, България
[2]Улица Нова 9, 91096 Мьорендорф, Германия
[3]Държавен научен център на Руската федерация, Институт по биомедицински проблеми, Москва, Русия
[4]Отдел за космическо време, Технологии за космическа среда, Лос Анджелис, Калифорния, САЩ
e-mail: tdachev59@gmail.com

Ключови думи: *Космическа радиация, МКС, галактически космически лъчи (ГКЛ), вътрешен и външен радиационен пояс*

Резюме: *Космическото време и свързаното с него йонизиращо лъчение се разглеждат като един от основните рискове за здравето на екипажа на космическата станция. Оценката на въздействието на радиацията върху хората на борда на Международната космическа станция (МКС) изисква на първо място точни данни за мощностите на погълнатата доза от различни източници на лъчение. Тези стойности зависят както от глобалното разпределение на компонентите на космическата радиация, така и от локалните вариации, породени от триизмерното разпределение на заобикалящата защитна обвивка.*

Introduction

The Low Earth Orbit (LEO) radiation environment sits below roughly 2,000 km altitude and is partially shielded by Earth's magnetic field and atmosphere, though it remains a dynamic mix of trapped radiation, cosmic rays and solar events.

Galactic and extragalactic cosmic rays

The dominant radiation component in near Earth space environment are the galactic cosmic rays (GCR) modulated in anti-correlation by the solar activity. The GCR are charged particles that originate from sources beyond our solar system. They are thought to accelerate at the highly energetic sources like neutron star collisions, black holes and supernovae stars within our Galaxy and beyond. GCR are the most penetrating of the major types of ionizing radiation. The distribution of GCR is believed to be isotropic throughout interstellar space. The energies of GCR particles range from several tens up to 10^{12} MeV nucleon^{-1}. The GCR spectrum consists of 98% protons, heavier ions (baryon component), 2% electrons, and positrons (lepton component). The baryon component is composed of 87% protons, 12% helium ions (alpha particles) and 1% heavy ions.

Trapped radiation belts

There are two distinct belts of toroidal shape surrounding Earth, where the high-energy charged particles are trapped in the Earth's magnetic field. Energetic protons and electrons within the Earth's radiation belts pose a hazard to both astronauts and spacecraft. The inner radiation belt (IRB), located between about 0.1 to 2 Earth radii, consists of both electrons with energies up to 10 MeV and protons with energies up to ~ 400 MeV. The outer radiation belt (ORB) starts from about four Earth radii and extends to about 9–10 Earth radii in the anti-sun direction. The outer belt mostly consists of relativistic electrons whose energy is between 2 and 10 MeV. The electron flux may cause problems for components located outside a spacecraft (e.g. solar cell degradation). They do not have enough energy to penetrate a heavily shielded spacecraft such as the ISS wall, but may deliver large additional doses to astronauts during extra vehicular activity (EVA) [1–4]. ORB was first observed By LIULIN instrument on "MIR" space station [1]. Also, with this instrument were observed the unique "New" radiation belt [5]

Solar Energetic Particles (SEP)

The SEP are mainly produced by solar flares, sudden sporadic eruptions of the chromosphere of the Sun. High fluxes of charged particles (mostly protons, some electrons and helium and heavier ions) with energies up to several GeV are emitted by processes of acceleration outside the Sun. The time profile of a typical SEP starts with a rapid exponential increase in flux, reaching a peak in minutes to hours. The energy emitted lies between 15 and 500 MeV nucleon^{-1} and the intensity can reach 104 cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}. Electrons with energies of ~0.5 to 1 MeV arrive at Moon, usually traveling along interplanetary field lines, within tens of minutes to tens of hours. Protons with energies of 20 to 80 MeV arrive within a few to ~10 hours, although some high-energy protons can arrive in as little as 20 minutes. SEP are relatively rare and occur most often during the solar maximum phase of the 11-year solar cycle. In the years of maximum solar activity up to 10 flares can occur, during the years of minimum solar activity only one event can be observed on average.

The radiation field at a location, either outside or inside the spacecraft is affected both by the shielding and by the distribution of the masses in the surrounding materials [6, 7]. Dose characteristics in LEO depend also on many other parameters such as the solar cycle phase; spacecraft orbit parameters, geophysical parameters.

Instruments description

The data from six different Liulin type instruments were used in this study. First row of figures of Fig. 1 contains six pictures of these instruments. They are presented as six but the R3DR and R3DR2 instruments in the right side are the same because ESA colleagues decided to use again the returned back to Earth R3DR instrument flown on ESA EXPOSE-R facility in EXPOSE-R2 facility [8].

LIULIN instruments [4] was designed in 1986–1988. It was used in the Russian "MIR" space station from April 1988 to August 1994 (pl. look Fig. 1.1). The measurements in the LIULIN instrument were based on a single silicon detector followed by a charge-sensitive shaping amplifier (CSA) Armtek A225 type (https://www.amptek.com/internal-products/a225-charge-sensitive-preamplifier-shaping-amplifier). The number of the pulses at the output of the CSA, above a given threshold, is proportional to the particle flux hitting the detector. The integral amplitude of the pulses in one exposition period at the output of the CSA is proportional to the particles' deposited energy. Thus, the integral of the energy depositions of the particles accumulated in the detector during the measurement interval allowed calculation of the dose rate.

LIULIN device (Fig. 1.1) was located in the workstation section of the "MIR" space station where the effective thickness of shielding was about 5 g cm^{-2} of matter. Therefore the contribution to the device readings could be supplied by electrons, protons and a-particles with an energy outside the space station equal to ***Ee >*** 10 MeV, ***Ep >*** 70 MeV and ***Ea >*** 200 MeV respectively [9].

The Mobile Radiation Exposure Control System Liulin-E094 (pl. look Fig. 1.3) was part of the experiment “Dosimetric Mapping” E094. It was placed in the US Laboratory module as a part of the Human Research Facility of ISS Expedition Two, Mission 5A.1 [10]. The system consists of four Mobile Dosimetry Units (MDU) and one Control and Interface Unit (CIU). The four MDUs were moved to different spots by the American astronauts to study the radiation distribution in the American Laboratory Module and NODE-1 of the American segment of the ISS [11, 12]. MDU number 2 (MDU-2) data are used in this study.

The MDU contains: one semiconductor detector with 0.3 mm thickness and 2.0 cm^2 area Canberra RF-14*14- 300-EB type; one low noise, hybrid, charge-sensitive preamplifier A225 type of AMPTEK Inc.; a fast 12 channel ADC; 2 microcontrollers and an 0.5 MB flash memory. A specially developed software manages the unit. The pulse amplitudes are proportional by a factor of 240 mV/MeV according to the AMPTEK A225F preamplifier specifications (https://www.amptek.com/internal-products/a225-charge-sensitive-preamplifier-shaping-amplifier). The amplitudes are digitized and organized in a 256-channel spectrum. Using the System International (SI) definition, the dose D (in Grey) is calculated from the sum of 256 channels amplitudes in MeV divided by the mass of the detector in kilograms. The described above schematics were multiplied in all further Liulin type instruments.

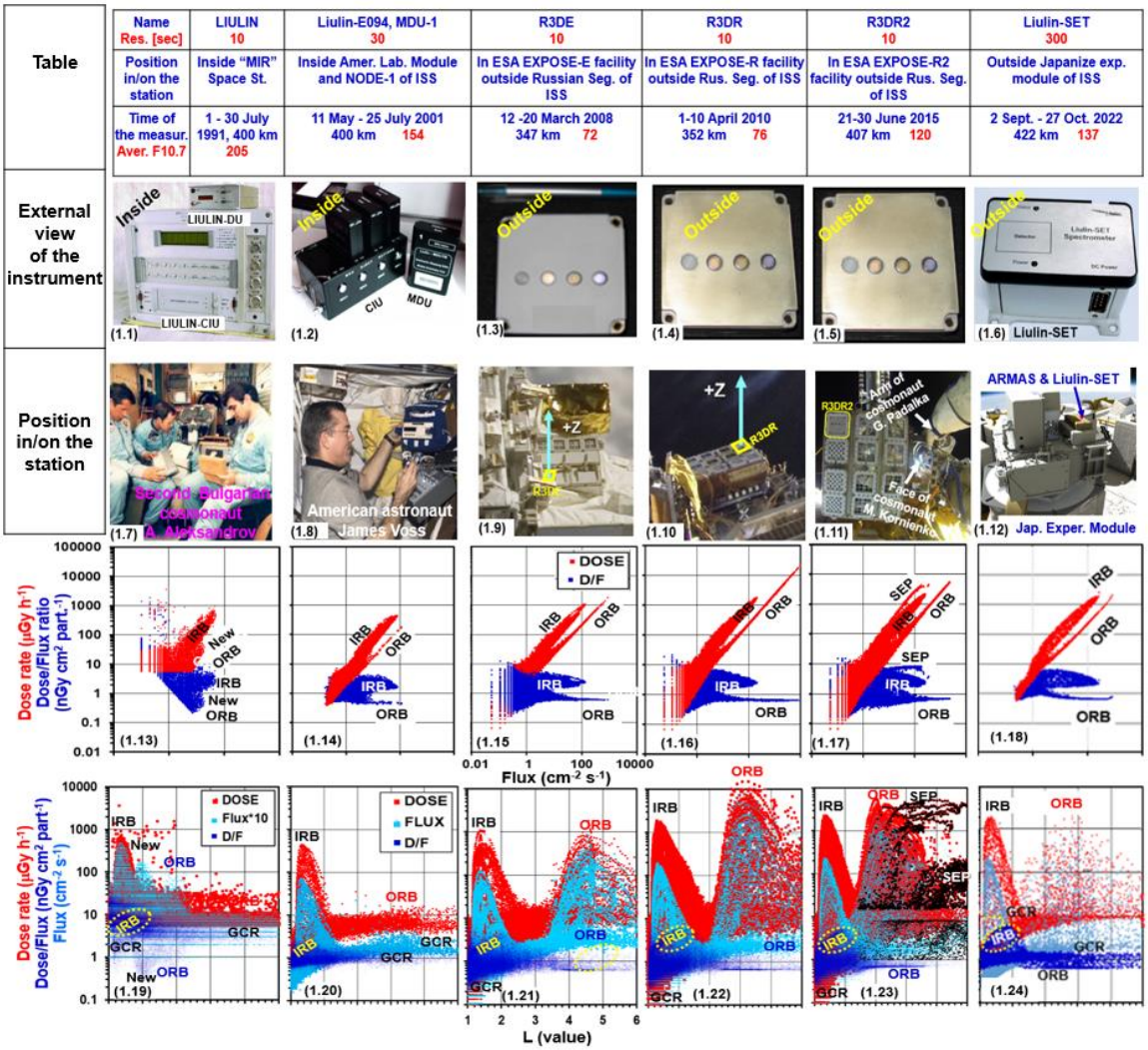


Fig. 1. Comparison of analogical graphics and data for six Liulin type experiments on “MIR” and ISS in the time July 1991-September 2022.

The European Space Agency (ESA) EXPOSE-E, EXPOSE-R and EXPOSE-R2 facilities [8] accommodated three Bulgarian-German Radiation Risk Radiometer-Dosimeters (R3D). R3DE instrument (pl. look Fig. 1.3) [2] was used at the EXPOSE-E facility on the Columbus module of ISS in 2008–2009. R3DR spectrometer (pl. look Fig. 1.4) [2] worked at the EXPOSE-R facility outside the Russian segment of ISS from 2009 to 2010. R3DR2 (pl. look Fig. 1.5) is the same R3DR instrument. It was part of EXPOSE-R2 facility outside the Russian segment of ISS from 2014 until 2016 [3]. The extension “R2”, same as for the EXPOSE-R2 facility, is used to distinguish its data from the data of the previous mission. The two R3D spectrometers were built on the same schematics as the described in the previous paragraph Liulin-E094,

MDU-2 unit. The detectors in R3D spectrometers are Hamamatsu S2744-08 silicon PIN photodiodes (Si PIN photodiode S2744-08 | Hamamatsu Photonics).

The Liulin-SET spectrometer (seen in Subfigure 1.6 of Fig. 1), was developed at the Space Research and Technology Institute of the Bulgarian Academy of Sciences and integrated within the Automated Radiation Measurements for Aerospace Safety (ARMAS) Flight Module Number 9 (FM9). Space Environment Technologies in Los Angeles, California, USA developed the ARMAS FM9 [13]. It was launched on February 19, 2022 with the Northrop Grumman-Antares rocket from NASA's East Coast Virginia space site and operated externally on the Japanese Experimental Module of the ISS for 216 days, from March to December 2022.

During the calibrations of Liulin-type instruments, it was found that the absolute values of the measured doses were within 2.8% and 8% of the reference value for the ^{137}Cs and ^{60}Co sources, respectively. The response of a LIULIN-4 spectrometer (identical in construction to R3D instruments was compared in [14] to that of the HAWK TEPC (http://www.fwt.com/detector/fw-ad1ds.htm) on 42 aircraft flights in 2003–2004. On all flights, the absorbed dose measured by both instruments agreed to within 5%. We consider that the flux and dose rate errors of the R3DR type measurements on ISS are within 10%.

The calibration procedures, performed with analogical to Liulin-E094 and R3D/E/R/R2 instruments, are described in [15, 16]. The response curve of these instruments is expected to be very similar to that published in [16] because since 2002 all Liulin instruments were manufactured using identical electronic parts and schematic.

The semiconductor detector of the R3D instruments was mounted approximately 7 mm below the 0.8 mm thick aluminium cover plate. Furthermore, there was shielding from 0.07 mm copper and 0.2 mm plastic, which provided 0.3 g cm^{-2} of total shielding from the front side. The calculated required kinetic energy of particles arriving perpendicular to the detector was 0.835 MeV for electrons and 19.5 MeV for protons. This means that only electrons and protons with energies exceeding the values listed above can cross the R3D shielding materials and reach the detector surface.

Data analysis

Radiation source selection procedure

The following four primary radiation sources were expected and recognized in the data obtained with the R3DR2 instrument: (i) globally distributed primary GCR particles and their secondary products; (ii) protons in the South Atlantic Anomaly (SAA) region of the IRB; (iii) relativistic electrons and/or bremsstrahlung in the high latitudes of the ISS orbit where the ORB is situated; and (iv) solar energetic particles (SEP) in the high latitudes of the ISS orbit. Together with the real SEP particles, a low flux of what were likely to be mostly secondary particles (SP) (protons, neutrons and heavier than protons ions) some of them associated with detector interactions were observed in the data.

The procedure is based on the experimental formulas for the dose to flux ratio for protons in the range 1–1000 MeV and for electrons in the range 1–10 MeV as published in the book of Haffner [17]. In [3] was demonstrated that according to Haffner's formulas [17] the data could be simply split into two parts by using the dose to flux ratio (D/F). When the measured by the R3DR2 instrument D/F is less than 1.12 nGy cm^2 particle^{-1}, the expected predominant type of radiation in a 10 s interval is ORB electrons. When the D/F is bigger than 1.12 nGy cm2 particle^{-1}, the expected type of radiation is IRB or SEP protons. The GCR source is divided between the two ranges. The new procedure allows the separation of electrons and protons into the internal radiation belt and the electrons and the SEP protons in the outer radiation belt.

Comparison of data from "MIR" and ISS stations in 1991–2022

The aim of Fig. 1 is to compare analogically data obtained at "MIR" and ISS by Liulin type instruments in the period 1991–2022. The main idea is to find the four-radiation sources and analyzed the dose rate dynamic in L-value distributions. Special attention is payed to the ORB relativistic electron source, observed at all studied missions as we are the first measuring the flux and dose rate from ORB relativistic electrons on "MIR" [5] and on the ISS [3].

There are four rows of figures and one row of table in the Fig. 1. In the first row is situated a table, which contains information for the name and position of the instruments, its measurement resolution in seconds (in red), the time interval of the measurements, the average altitude of the vehicle in km and the average for this time interval F10.7 cm Radio Flux (in red color) in solar flux units (Solar Cycle Progression | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center).

The first row of figures (Fig. 1.1 – Fig. 1.6) visualize the external views of the instruments: First is the picture of LIULIN, next is Liulin-E094, further are the R3DE, R3DR and R3DR2 instruments. The last is the Liulin-SET instrument (Fig. 1.6). As already, mentioned R3DR2 instrument is R3DR but with different name to distinguish from R3DR.

The second row of figures contains pictures showing the position of the instruments “inside” or “outside” of the stations. In Fig. 1.7, the Second Bulgarian cosmonaut Aleksandr Panayotov Aleksandrov inside the “MIR” space station is seen. The American astronaut James S. Voss, who preferably worked with the “Dosimetric mapping” devices, including Liulin-E094 [10], is seen in Fig. (1, 8).

The third row of figures in Fig. 1 presents six graphics of the dose rate from flux and dose to flux (D/F) from flux dependencies. On the horizontal axis is the flux in cm^{-2} s^{-1}, while on the vertical axes are two parameters: the dose rate in μGy h^{-1} (red points) and the dose to flux ratio in nGy cm^2 $particle^{-1}$ (blue points). These graphics are a fast and easy way of visualizing the four different radiation sources components registered at the stations altitudes.

Following common features can be mentioned, analyzing Fig.1:

a) SEP particles are observed only in figures Fig. 1.17 and Fig. 1.23.

b) The dose rates in the IRB and ORB sources in figures Fig. 1.13, Fig.1.14, Fig. 1.19 and Fig 1.20 are the smallest because both data sets are obtained inside the “MIR” and the ISS space stations. The walls of the stations reduce the amount of energetic electrons and protons from other and inner belts respectively.

In the figures (1, 13) to (1, 18), the following radiation sources are observed: (1) GCR particles, (2) protons with more than 15.8 MeV energy in the SAA region of the IRB and (3) relativistic electrons with energies above 0.78 MeV. The dose rates (red points) from IRB and the IRB sources are seen as two maxima in the diagonal of each of the first four pictures. An additional maximum from SEP particles is seen in the Fig. (1, 17) above the usual IRB maximum. SEP measurements based on data from the R3DR2 instrument were already published [3].

The dose to flux ORB maxima (blue points) are situated horizontally in the bottom of figures from (1, 13) to (1, 18). The amount of points is narrower and below the thicker ones IRB D/F maxima. The ORB D/F maxima lies almost in all flux values below 1.12 nGy cm^2 $particle^{-1}$, which according to [3, 17], shows that the predominant amount of particles there are energetic electrons. On the opposite, the IRB D/F maxima lies in all flux values in the range 1.12–9.0 nGy cm^2 $particle^{-1}$, which according to Haffner’s formulas shows that the predominant amount of particles there are energetic protons. The SEP D/F maximum in Fig. (1. 17) shows D/F values larger than IRB maximum values and reveal that the protons there are with smaller energies than in the protons in the IRB maxima.

The bottom row of Fig. 1 contains six graphics with L-value in the horizontal axes and dose rate, flux and dose to flux ratio values in the vertical axes. These are types of magnetic latitudinal profiles from the equatorial latitudes (L = 1) up to high magnetic latitudes (L = 6).

The IRB dose rate maxima are situated in the left side of the figures at L = 1.4, while the flux maxima are at a-bit lower L-values. This L-value position reflect the position of the SAA in the inner belt. The flux and dose rate IRB maxima values in Fig. (1, 19) and (1, 20) are the smallest because LIULIN and Liulin-E094 devices were inside the “MIR and ISS space stations. The larger shielding by the stations walls attenuate the IRB proton flux and lower the dose rates.

The IRB dose to flux ratio in all (1, 19) to (1, 24) figures is with small values above 1.12 nGy cm^2 $particle^{-1}$ at small L-values. At L-values between 1.4 and 2.2, a rising strait line structure is observed. It is explanted with the decreasing energy of the protons away from the SAA center.

The ORB dose rate and flux maxima are well seen in figures 1.21 to 1.24, presenting ORB data from outside the ISS. In figure (1, 20) the ORB dose rate maximum is relatively small because the position of Luulin-E094 instrument inside the ISS. Larger shielding prevent the penetration of energetic protons in ORB inside the station.

Numerical results from the observation in 1991–2022

During the experiments with the R3D/E/R/R2 instruments on EXPOSE-E/R/R2 platforms [8] in 2008–2009, 2009–2010 and 2014–2016 outside the ISS [3, 15] behind 0.25–0.5 g cm^2 shielding, the following averaged GCR daily absorbed dose rate was measured - 91.1/81.4/71.6 μGy day^{-1}. The falling trend in the averaged GCR daily doses is explained with the higher solar-activity during the EXPOSE-R2 mission in 2014–2016 in comparison with EXPOSE-E/R missions in 2008–2010.

The largest absorbed dose delivery inside the ISS is due protons and electrons of the IRB in the area of the South-Atlantic Anomaly (SAA) where the energetic particles come closer to the Earth surface owing to a displacement of the magnetic dipole axes from the Earth’s center. The daily average SAA doses reported by [10] inside of the ISS vary in the range 74-215 μGy d^{-1} for the absorbed dose rates. The IRB R3D/E/R/R2 daily average absorbed dose rates outside the ISS are 426/506/567 μGy d^{-1}, while the ORB daily average doses are 8.64/89/278 μGy d^{-1}.

Only R3D/R2 instrument observed SEP event in June 2015 [3]. The daily SEP absorbed dose rate reached 2846 μGy d^{-1}on 22 June 2015.

Conclusions

The main conclusion of the presented data is that the ORB enhancements, the PBs events and the penetrations of relativistic electrons at low L-values and in the IRB are common on the manned “MIR” and ISS space stations. Although the obtained doses do not pose extreme risks for the astronauts, being on extra vehicular activity, they have to be considered as a permanently detected radiation source, which requires additional comprehensive investigations.

References:

1. Dachev, T.P., 2009, Characterization of near Earth radiation environment by Liulin type instruments, Adv. Space Res., 44, 1441-1449, http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2009.08.007.
2. Dachev, T, Tomov B., Matviichuk Y., Dimitrov P. Bankov N., Semkova J., Koleva R., Petrov V., Shurshakov V., Benghin V., 2012, Relativistic electron precipitation variations on manned spacecraft, Proceedings of Eighth Scientific Conference SPACE, ECOLOGY, SAFETY 4-6 December 2012, Sofia, Bulgaria, 44–54. http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202012_DOKLADI/PROCEEDINGS%20SES%202012.pdf
3. Dachev, T. P., Bankov, N. G., Tomov, B. T., Matviichuk, Y. N., Dimitrov, P. G., Häder, D.-P. & Horneck, G. Overview of the ISS radiation environment observed during the ESA EXPOSE-R2 mission in 2014–2016. Space Weather, 15, 1475–1489, 2017. https://doi.org/10.1002/2016SW001580
4. Dachev T.P., Tomov B.T., Matviichuk Yu.N., Dimitrov P.G., Mitev M.M., Jordanova M.M., Semkova J.V., Koleva R.T., Malchev St., Bankov N.G., Mitrofanov I., Golovin D., Litvak M., Sanin A., Shurshakov V., Benghin V., Ivanova O., Ploc O., Kubancak J., Häder D.-P., Lebert M., Schuster M., Reitz G., Horneck G., Uchihori Y., Kitamura H., Tobiska W., Hogan B., Gersey B., Okuyama K-I., Tapia I., Fajardo I., Saganti P., 2026. Bulgarian Instruments for Aircraft, Space and Ground Based Radiation Dosimetry and Their Main Scientific Results. Workshop Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere, pp. 179–191. https://doi.org/10.31401/WS.2026.proc.21
5. Shurshakov, V.A., Petrov, V.M., Makhmutov, V.S. and Dachev, T.P., 1996. New radiation belt dynamics according to measurements made by the Liulin dosimeter on board the MIR Space Station in 1991. Radiation measurements, 26(3), pp. 379–384. https://doi.org/10.1016/1350-4487(96)00040-6
6. Badhwar G.D, 2002. Shuttle Radiation Dose Measurements in the International Space Station Orbits, Radiation Research 157(1), 69-75. https://doi.org/10.1667/0033-7587(2002)157[0069:SRDMIT]2.0.CO;2
7. Benton, E.R., Benton, E.V. and Frank, A.L., 2001. Neutron dosimetry in low-earth orbit using passive detectors. Radiation measurements, *33*(3), 255-263. Rabbow, E., Rettberg, P., Barczyk, S., Bohmeier, M., Parpart, A., Panitz, C.,…Reitz, G., 2015. The astrobiological mission EXPOSE-R on board of the International Space Station, International Journal of Astrobiology, 14, 3–16. https://doi.org/10.1017/S1473550414000202
8. Rabbow, E., Rettberg, P., Parpart, A., Panitz, C., Schulte, W., Molter, F., Jaramillo, E., Demets, R., Weiß, P. and Willnecker, R., 2017. EXPOSE-R2: the astrobiological ESA mission on board of the International Space Station, *Frontiers in Microbiology*, *8*, p. 1533–1545. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01533
9. Lobakov, A.P., Lyagushin, V.I., Panasyuk, M.I., Shavrin, P.I., Makhmutov, V.S., Petrov, V.M., Shurshakov, V.A., Dachev, T.P. and Semkova, I.V., 1992. Increase of solar cosmic rays on the “MIR” space station in orbit during September–October 1989. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 20(1), pp. 59–64.
10. Reitz, G., Beaujean, R., Benton, E., Burmeister, S., Dachev, Ts., Deme, S., Luszik-Bhadra, M., Olko, P., 2005. Space radiation measurements on-board ISS-the DOSMAP experiment. Radiat. Prot. Dosim. 116, 374–379. http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/116/1-4/374.
11. Wilson, J. W., J. E. Nealy, T. Dachev, B.T. Tomov, F. A. Cucinotta, F. F. Badavi, G. de Angelis, N. Leutke, W. Atwell, Time serial analysis of the induced LEO environment within the ISS 6A, 2007, Adv. Space Res., 40, 11, 1562–1570, doi:10.1016/j.asr.2006.12.030.
12. Nealy, J.E., Cucinotta, F.A., Wilson, J.W., Badavi, F.F., Zapp, N., Dachev, T., Tomov, B.T., Semones, E., Walker, S.A., De Angelis, G., Blattnig, S.R., Atwell, W., 2007. Pre-engineering spaceflight validation of environmental models and the 2005 HZETRN simulation code. Adv. Space Res.40 (11), 1593–1610. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2006.12.030
13. Tobiska, W.K., J. Bailey, 2023. Automated Radiation Measurements for Aerospace Safety Aeronautical Regional Geospatial Observer System (ARMAS ARGOS), April 21, 2023. https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u97/Baily%20Tobiska%20ARMAS%20ARGOS%20talk%20Tobiska%20Bailey.pptx_.pdf
14. Green, A. R., et al. "An empirical approach to the measurement of the cosmic radiation field at jet aircraft altitudes." *Advances in Space Research* 36.9 2005: 1618–1626.
15. Dachev, T. P., Semkova, J. V., Tomov, B. T., Matviichuk, Y. N., Dimitrov, P. G., Koleva, R. T., Kubancak, I. N. 2015. Overview of the Liulin type instruments for space radiation measurement and their scientific results. Life Sciences and Space Research, 4, 92–114. https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.01.005.
16. Uchihori, Y., Kitamura, H., Fujitaka, K., Dachev, T.P., Tomov, B.T., Dimitrov, P.G., Matviichuk, Y., 2002. Analysis of the calibration results obtained with Liulin-4J spectrometer–dosimeter on protons and heavy ions. Radiation Meas., 35, 127–134. https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00286-4
17. Haffner, J. W., 1967. Yadernoe izluchenie i zashchita v kosmose (Nuclear Radiation and Protection in Space), pp 115, Atomizdat, Moscow, 1971. (Book in Russian), translated from: J. W. Haffner, Radiation and shielding in space. NY: Academic Press, 1967.

FEATURES OF COSMIC-RAY DETECTION WITH A TWO-DETECTOR TELESCOPE

Krasimir Krastev[1], Jordanka Semkova[1], Rositza Koleva[1], Viktor Benghin[2], Sergey Drobyshev[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2] Institute for Biomedical Problems – Russian Academy of Sciences
e-mail: bwfer@yandex.ru

Keywords: *cosmic rays; Geant4; Fe-56; secondary particles; coincidence detection.*

Abstract: *Cosmic-ray measurements with two-detector telescopes rely on coincident energy deposition in two sensitive volumes. Such coincidences, however, may arise from different physical mechanisms because interactions of primary particles with detector materials and surrounding structures generate secondary-particle cascades. This study examines complete particle histories for 1 GeV/nucleon Fe-56 nuclei simulated using a detailed Geant4 model of a two-detector silicon telescope. Three geometrical classes are investigated: Case 2, in which the primary intersects neither detector; Case 3, in which it intersects both detectors; and Case 5, in which it intersects only one detector. For each class, events with minimum and maximum total energy deposition in detector A are selected. Their particle trajectories, secondary species, genealogy, generation depth, and detector energy deposition are analyzed. Case 2 demonstrates coincidences generated exclusively by secondary particles, including electron-mediated signals and a high-deposition event involving an Fe-55 fragment. Case 3 provides the direct primary-traversal reference. Case 5 demonstrates mixed registration: the primary traverses detector A, while secondary electrons produce the signal in detector B. The selected Case 5 events additionally illustrate the strong influence of the primary path length within silicon, from partial edge traversal to passage along the detector width. These results show that identical coincidence criteria can select physically different events and that complete cascade reconstruction is essential for interpreting the response of cosmic-ray telescope detectors.*

ОСОБЕНОСТИ ПРИ РЕГИСТРАЦИЯТА НА КОСМИЧЕСКИ ЛЪЧИ С ДВУДЕТЕКТОРЕН ТЕЛЕСКОП

Красимир Кръстев[1], Йорданка Семкова[1], Росица Колева[1], Виктор Бенгин[2], Сергей Дробишев[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Институт по медико-биологични проблеми – Руска академия на науките
e-mail: bwfer@yandex.ru

Ключови думи: *космически лъчи; Geant4; Fe-56; вторични частици; регистрация на съвпадение*

Резюме: *Изследвани са механизмите на регистрация на космически лъчи в двудетекторен силициев телескоп чрез пълно проследяване на каскадите от частици, породени от ядра Fe-56 с енергия 1 GeV/нуклон. Анализирани са събития, при които първичната траектория не пресича нито един детектор (Case 2), пресича двата (Case 3) или само единия (Case 5). За всеки клас са разгледани събития с минимално и максимално енергоотделяне в детектор A. Определени са приносите на първичните и вторичните частици и влиянието на геометрията на преминаване върху регистрираната енергия.*

1. Introduction

Silicon telescope detectors identify charged-particle events by requiring energy deposition in two spatially separated sensitive volumes. Although this coincidence condition is useful for selecting penetrating radiation, the coincidence itself does not establish whether the original cosmic-ray particle crossed both detectors. Nuclear and electromagnetic interactions in the instrument and nearby structures can produce secondary particles that also deposit energy in the sensitive volumes.

This work continues the earlier Liulin-MO numerical study by Krastev [1], which established geometrical event classes and characterized secondary-induced coincidences statistically. Here the emphasis shifts to complete, event-by-event Fe-56 cascade histories.

2. Simulation model and event selection

The analysis uses Geant4 particle-transport outputs for Fe-56 primaries with kinetic energy 1 GeV per nucleon (56 GeV per nucleus), including a detailed representation of the silicon detectors and nearby instrument materials. The coincidence condition requires deposited energy exceeding 70 keV in both detectors A and B, independently of the identity of the depositing particles.

Geometrical classification is based on the primary trajectory, independently of subsequent interactions: Case 2 neither detector intersected; Case 3 both detectors intersected; Case 5 only detector A intersected. For each class, the event with the smallest and the event with the largest total energy deposition in detector A were selected. “MIN” and “MAX” therefore refer to detector-A energy deposition, not to the size of the cascade.

Complete step-level histories were examined to identify particle tracks, parent-daughter relationships, generation depth, interaction processes, and energy deposition in the sensitive volumes. The thick black line in trajectory visualizations marks the primary Fe-56 trajectory; colored lines denote secondary particles.

3. Results and discussion

3.1. Case 2: secondary-mediated coincidences

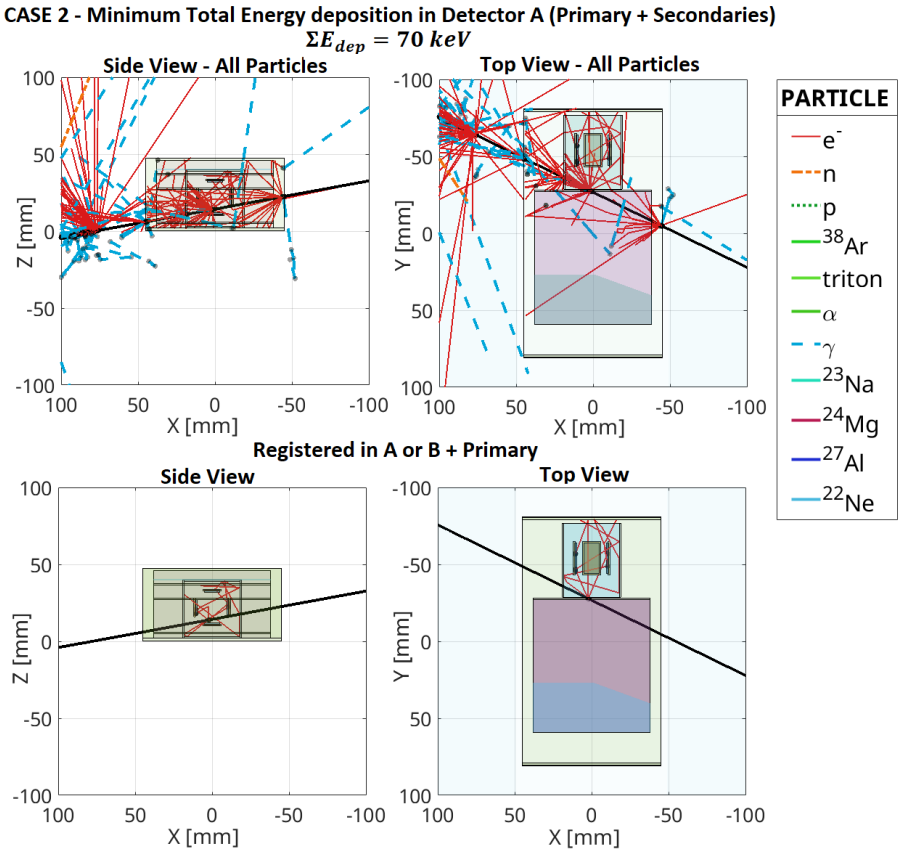


Fig. 1. Case 2 MIN: full cascade (top) and detector-contributing trajectories (bottom). Thick black line: primary Fe-56; colored lines: secondary particles.

Fig. 1 shows a Case 2 event in which the primary Fe-56 trajectory intersects neither detector. Nevertheless, secondary electrons deposit 0.07001 MeV in detector A and 0.92692 MeV in detector B, satisfying the coincidence condition. The cascade contains 2,466 tracks and 8,695 simulation steps and reaches generation five. Detector A receives its signal exclusively from secondary electrons. Two first-generation electrons originating in nearby textolite account for approximately 58.05 keV of the 70.01 keV signal; the remainder is supplied by further electron tracks. This event demonstrates a threshold-level coincidence without direct primary traversal.

The maximum-energy Case 2 event (Fig. 2) exhibits a markedly different mechanism. It contains 41,083 tracks and 94,623 steps, reaching generation nine. Detector A receives 469.278 MeV: 295.689 MeV (63.0%) from a secondary Fe-55 nucleus, 173.589 MeV (37.0%) from electrons, and a negligible photon contribution. Detector B receives 1.370 MeV from electrons. The Fe-55 fragment is a daughter of the primary Fe-56 nucleus. Thus, a large detector-A signal can be generated by a nuclear fragment even though the initial primary trajectory misses both sensitive volumes.

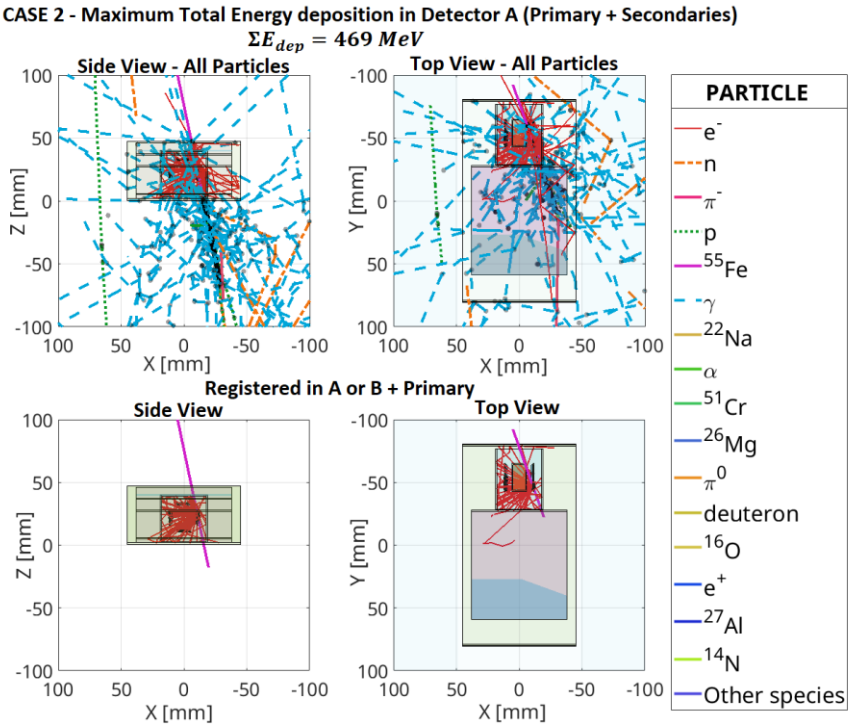


Fig. 2. Case 2 MAX: complete particle cascade and detector-contributing trajectories. The primary trajectory misses both detectors.

3.2. Case 3: genuine telescope traversals

Case 3 is the reference geometry for a genuine telescope traversal: the initial Fe-56 trajectory intersects both sensitive volumes. In the selected minimum-energy event (Event 90648350), the reconstructed history contains 12,692 tracks and 29,188 steps, with a maximum generation of four. The energy deposition is approximately 79.58 MeV in detector A and 78.71 MeV in detector B. The primary Fe-56 nucleus contributes approximately 51.25 and 50.81 MeV, respectively; secondary electrons account for most of the remaining energy.

For the selected maximum-energy Case 3 event (Event 60472254), 21,986 tracks and 51,175 steps are recorded, again with a maximum generation of four. The total energy deposition is approximately 117.22 MeV in detector A and 114.55 MeV in detector B. The primary deposits approximately 73.53 MeV in detector A and 73.55 MeV in detector B, with substantial additional electron contributions. These two events demonstrate direct heavy-ion traversal of both detectors, but also show that the measured energy is not necessarily attributable to the primary alone.

3.3. Case 5: mixed registration and path-length effects

Figures 3 and 4 illustrate the minimum-energy event selected for Case 5, in which the primary Fe-56 nucleus traverses detector A without intersecting detector B. Although the primary particle passes through only one of the two sensitive volumes, energy deposition is recorded in both detectors as a result of secondary-particle transport. This event therefore demonstrates how a two-detector coincidence can arise even when the primary ion does not directly cross both detectors.

The total simulated energy deposition in detector A is 11.164 MeV. Of this amount, 7.292 MeV (65.3%) is deposited directly by the primary Fe-56 nucleus, while secondary electrons contribute 3.873 MeV (34.7%). The contribution from photons is negligible. In detector B, the deposited energy is 0.789 MeV and is produced entirely by secondary electrons. Thus, the signal in detector B is not associated with a direct passage of the primary nucleus but with the transport of charged secondary particles generated during the development of the interaction cascade.

The enlarged three-dimensional view in Fig. 4 provides a clearer representation of the primary trajectory relative to the sensitive silicon volumes. In this particular event, the Fe-56 nucleus passes close to the boundary of detector A, resulting in a relatively short path through its active material. Consequently, the energy deposited directly by the primary particle is substantially lower than that expected for a trajectory crossing the full nominal detector thickness.

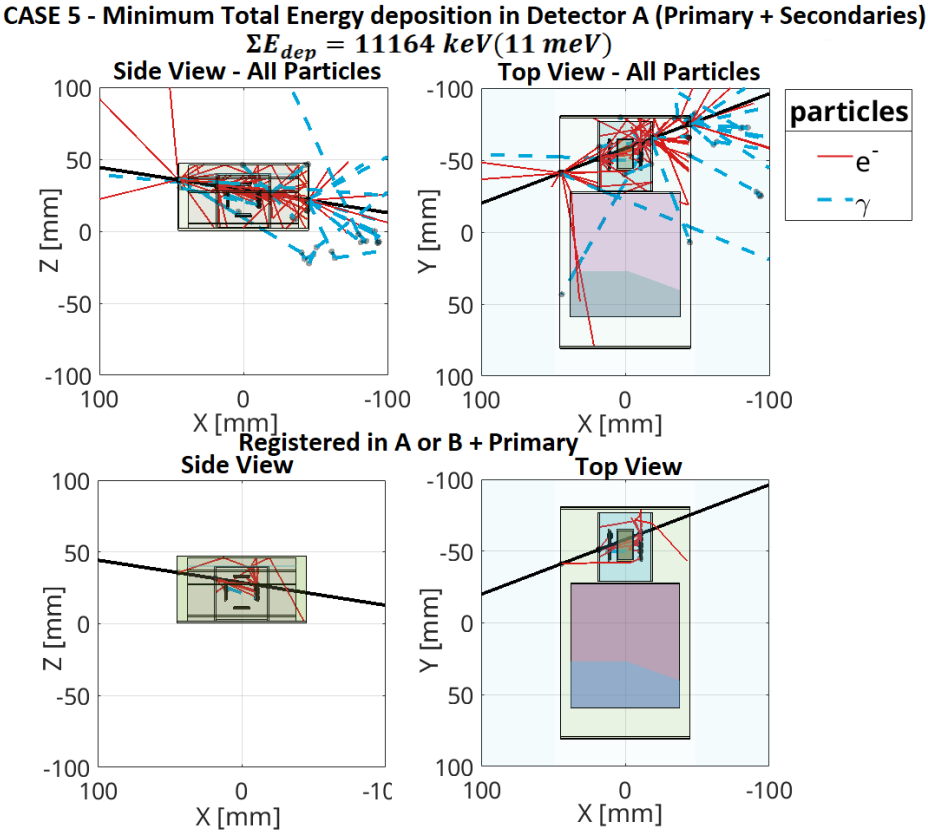


Fig. 3. Case 5 MIN: side and top projections of the full cascade and detector-contributing tracks. The thick black line shows primary Fe-56.

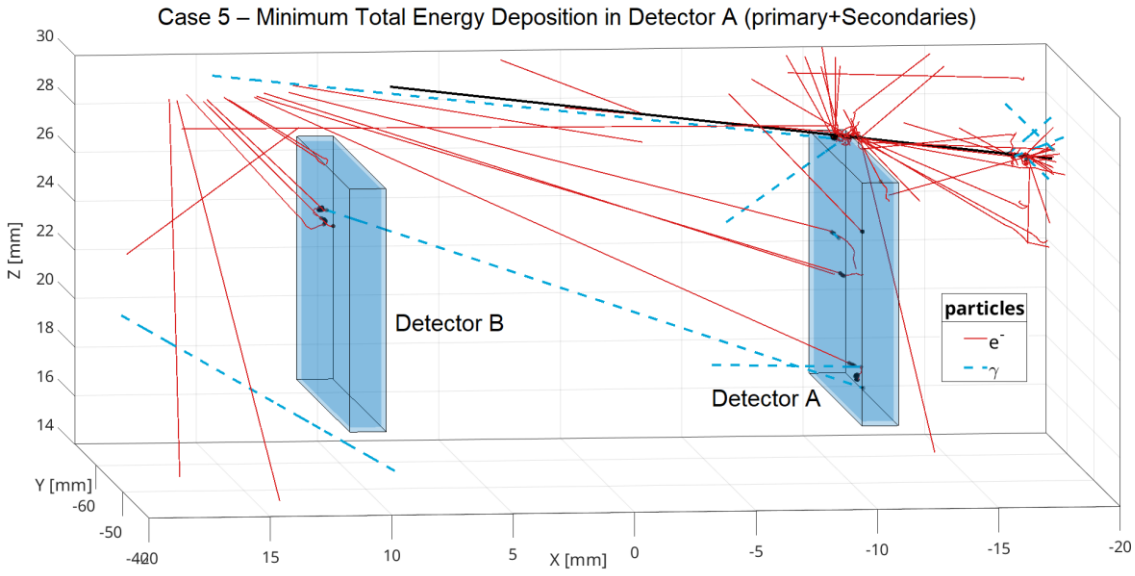


Fig. 4. Enlarged three-dimensional view of Fig. 3 showing only sensitive detectors A and B; red lines: electrons; dashed blue lines: photons.

For comparison, an Fe-56 ion with a kinetic energy of 1 GeV per nucleon traversing the nominal 300 µm silicon thickness would be expected to deposit approximately 80 MeV under the reference geometry considered in this study. The substantially smaller total energy deposition of 11.164 MeV in detector A is therefore consistent with a partial traversal of the sensitive volume. This comparison is qualitative, since the actual energy loss depends on the trajectory, effective path length, local interaction processes, and production and transport of secondary particles.

An important feature of this event is that secondary electrons account for approximately one-third of the total energy deposited in detector A, despite the relatively short primary-particle path. Their contribution illustrates that the recorded signal cannot always be interpreted solely in terms of the direct ionization losses of the incident heavy ion. Secondary-particle transport can modify the energy-deposition pattern in the detector traversed by the primary nucleus and simultaneously produce a detectable signal in the neighboring detector.

From the perspective of telescope response, the event highlights two distinct effects. First, trajectories passing near the boundaries of the sensitive volume may produce energy-deposition values substantially below those associated with a full-thickness traversal. Second, secondary particles may generate a signal in a detector that is not intersected by the primary ion. The combination of these effects can complicate the interpretation of coincidence events and contribute to the population of intermediate energy-deposition regions in simulated telescope spectra.

The present event should be regarded as an illustrative example rather than a statistically representative description of all Case 5 events. Nevertheless, it demonstrates the importance of considering the actual primary-particle trajectory together with the individual contributions of secondary particles when interpreting the response of a two-detector silicon telescope.

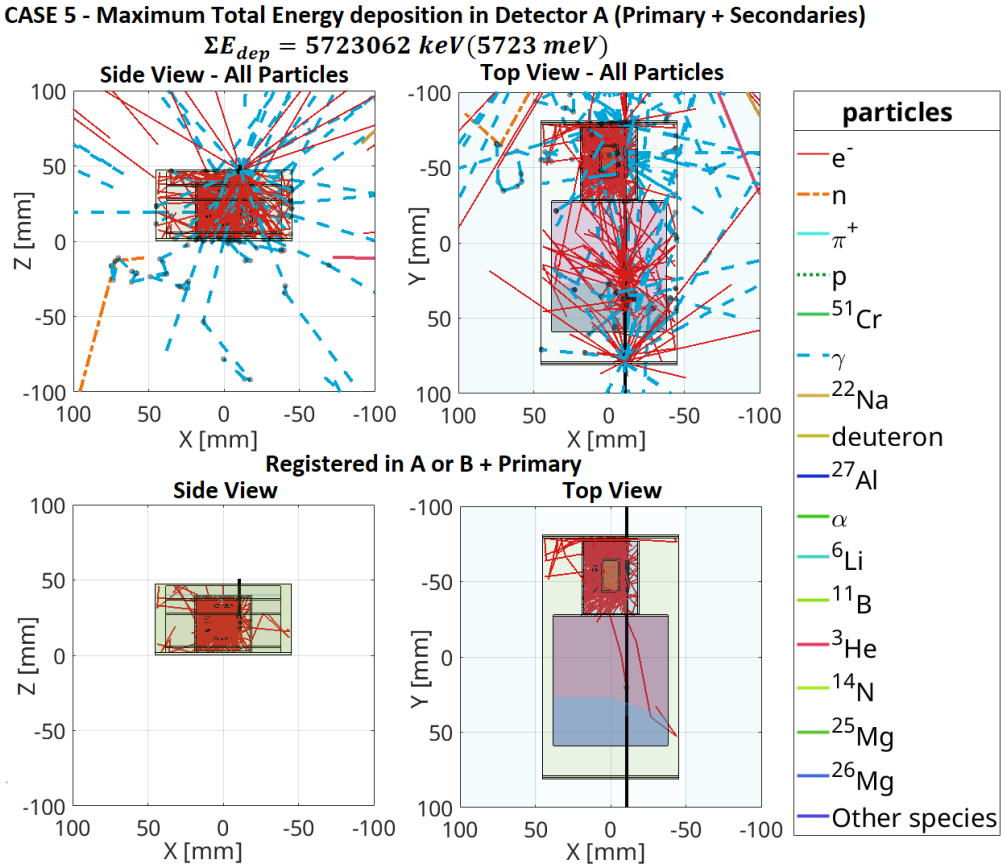


Fig. 5. Case 5 MAX: full and detector-contributing trajectories. Primary Fe-56 traverses the full width of detector A, generating an unusually long path in silicon.

Fig. 5 illustrates the opposite geometrical extreme within Case 5. The primary Fe-56 nucleus travels along the full width of detector A, producing a much longer path in silicon than a conventional 300 µm traversal. The event contains 459,409 tracks and 987,321 steps, with a maximum generation of nine. Detector A receives 5,723.062 MeV, comprising 3,618.920 MeV from the primary Fe-56 track, 2,104.135 MeV from electrons, and approximately 0.006 MeV from photons. Detector B receives 9.760 MeV from secondary electrons, while the primary does not traverse that detector.

The unusually high detector-A signal is thus associated with the extended primary path in the active silicon and the accompanying electron cascade, not with an ordinary traversal through 300 μm of silicon. The minimum and maximum Case 5 events together illustrate how geometry and secondary production can produce widely differing signals within the same event class. A quantitative explanation of the 3.62 GeV primary-track contribution would require step-resolved examination of the primary energy-loss and interaction processes along the full path.

3.4. Quantitative comparison

Table 1. Particle-resolved deposited energy in the two sensitive detectors for all six events (MeV)

Case	Selection	Detector	Fe-56	Fe-55	e−	γ	Total (MeV)
2	MIN	A	0.000000	0.000000	0.070008	0.000000	0.070008
2	MIN	B	0.000000	0.000000	0.926918	0.000000	0.926918
2	MAX	A	0.000000	295.689253	173.588877	0.000313	469.278443
2	MAX	B	0.000000	0.000000	1.370180	0.000000	1.370180
3	MIN	A	50.810296	0.000000	27.898208	0.000000	78.708504
3	MIN	B	51.251112	0.000000	28.326483	0.000029	79.577624
3	MAX	A	73.526768	0.000000	43.695093	0.000208	117.222069
3	MAX	B	73.553916	0.000000	40.992193	0.000000	114.546109
5	MIN	A	7.291630	0.000000	3.872690	0.000049	11.164369
5	MIN	B	0.000000	0.000000	0.789049	0.000000	0.789049
5	MAX	A	3618.920464	0.000000	2104.135136	0.006236	5723.061836
5	MAX	B	0.000000	0.000000	9.759631	0.000000	9.759631

The event selection refers to minimum or maximum deposited energy in detector A, not to cascade multiplicity.

4. Conclusions

Complete Geant4 particle-history reconstruction distinguishes three physically different mechanisms of two-detector coincidence for 1 GeV/nucleon Fe-56 primaries. First, Case 2 demonstrates that secondaries alone can activate both detectors, through electron cascades or heavy nuclear fragments. Second, Case 3 confirms direct primary traversal of both detectors, with additional secondary-electron energy deposition. Third, Case 5 shows mixed registration, in which the primary crosses only detector A while electrons produce the coincidence signal in detector B. The Case 5 extremes further demonstrate the importance of primary path length in silicon: partial traversal near an edge can produce an intermediate signal, whereas traversal along the detector width can lead to exceptionally large energy deposition. The results support event-by-event cascade analysis as a complement to population-level telescope response simulations.

References:

1. Krastev, K. (2026). Numerical Analysis of Genuine and Secondary-Induced Events in the Liulin-MO Telescope aboard ExoMars Trace Gas Orbiter. In: Book of Proceedings, Eighteenth Workshop on Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere, pp. 271–281. ISSN 2367-7570. https://doi.org/10.31401/WS.2026.proc

COMPARISON OF ANALYTICAL CALCULATIONS AND GEANT4 SIMULATIONS OF THE GEOMETRICAL FACTOR AND MEAN PARTICLE PATH LENGTH IN THE LIULIN-MO DETECTOR ONBOARD THE TRACE GAS ORBITER

Krasimir Krastev[1], Jordanka Semkova[1], Rositza Koleva[1], Viktor Benghin[2], Sergey Drobyshev[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Institute for Biomedical Problems – Russian Academy of Sciences
e-mail: bwfer@yandex.ru

Keywords: *Liulin-MO; geometrical factor; mean particle path length; Geant4*

Abstract: *The geometrical factor and mean particle path length are important parameters for the quantitative interpretation of particle-telescope measurements. In this work, analytical calculations of the mean particle path length in the Liulin-MO detector telescope are compared with numerical results obtained using Geant4 simulations. For a single 1 × 2 cm², 300 μm thick silicon detector in an isotropic particle field, Cauchy's theorem gives a mean path length of 574.16 μm, while for particles crossing both detectors of the telescope the analytical calculation gives approximately 320 μm. For the simplified four-PIN-Photodiod detector geometry, Geant4 gives mean path lengths of 571.42 and 587.06 μm for the individual detectors and 318.51 and 316.68 μm for particles crossing both detectors. The geometrical factor is determined numerically using a spherical source with a radius of 150 cm and cosine angular sampling. The effects of a 70 keV deposited-energy threshold and of the complete Liulin-MO + FREND instrument + Trace Gas Orbiter (TGO) satellite geometry are also investigated. The numerical results are in good agreement with the analytical estimates.*

СРАВНЕНИЕ НА АНАЛИТИЧНИ ИЗЧИСЛЕНИЯ И СИМУЛАЦИИ С GEANT4 НА ГЕОМЕТРИЧНИЯ ФАКТОР И СРЕДНИЯ ПЪТ НА ЧАСТИЦИТЕ В ДЕТЕКТОРА LIULIN-MO НА БОРДА НА TRACE GAS ORBITER

Красимир Кръстев[1], Йорданка Семкова[1], Росица Колева[1], Виктор Бенгин[2], Сергей Дробишев[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Институт за медико-биологически проблеми – Руска академия на науките
e-mail: bwfer@yandex.ru

Ключови думи: *Liulin-MO; геометричен фактор; среден изминат път; Geant4*

Резюме: *Геометричният фактор и средният път на частиците са важни параметри за количествената интерпретация на измерванията с телескопи от детектори. В настоящата работа аналитичните изчисления на средния път на частиците в детекторния телескоп на Liulin-MO са сравнени с числени резултати, получени чрез симулации с Geant4. За единичен силициев детектор с размери 1 × 2 cm² и дебелина 300 μm в изотропно поле теоремата на Коши дава среден път 574.16 μm, а за частици, преминаващи през двата детектора на телескопа, аналитичното изчисление дава приблизително 320 μm. За опростената геометрия с четири PIN детектора Geant4 дава 571.42 и 587.06 μm за отделните детектори и 318.51 и 316.68 μm за частиците, преминаващи през двата детектора. Геометричният фактор е определен числено чрез сферичен източник с радиус 150 cm и косинусово ъглово разпределение. Изследвани са също така ефектите от прага на отложена енергия от 70 keV, както и от пълната геометрия на инструмента Liulin-MO + FREND + спътника Trace Gas Orbiter (TGO). Получено е добро съгласие между числените резултати и аналитичните оценки.*

Introduction

The geometrical factor and mean particle path length are important characteristics of particle detectors. The geometrical factor relates the measured counting rate to the incident particle flux, while the particle path length in the sensitive volume is related to the deposited energy and is therefore important for the determination and interpretation of dosimetric quantities.

Liulin-MO is a separate dosimetric module of the Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) [7, 8]. Its silicon detector system measures the charged-particle component of the radiation environment and complements the neutron measurements performed by FREND.

For an idealized detector geometry, the mean particle path length can be calculated analytically. In the real instrument, however, particle transport is influenced by the detector materials and by the surrounding Liulin-MO, FREND and TGO structures. Geant4 simulations allow these effects to be included and also provide a numerical determination of the geometrical factor.

The aim of this work is to compare analytical and Geant4 results for the mean primary-particle path length and to determine the geometrical factor numerically. Calculations are performed for a simplified four-PIN-detector geometry and for the complete Liulin-MO + FREND + TGO model. The influence of a 70 keV deposited-energy threshold is also investigated.

Analytical Calculation of the Mean Particle Path Length

The geometrical factor can be determined directly using the expression given by Thomas and Willis [9]. For each of the Liulin-MO telescopes, a value of 1.38 cm² sr is obtained.

For particles crossing both detectors of the telescope, the path length in the upper detector depends on the angle of incidence (Fig. 1).

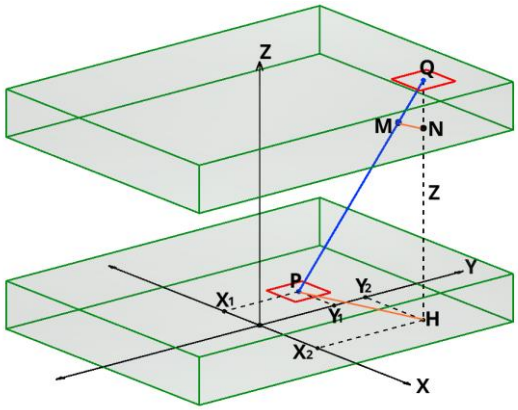


Fig. 1. Geometry used for the analytical calculation of the mean primary-particle path length through the Liulin-MO telescope

The mean path length can be obtained by weighting the individual particle paths by the corresponding contribution to the telescope counting rate. This gives

$$\bar{l} = \frac{QN}{QH} \frac{\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{QP\,dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\left\{Z^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2\right\}^2}}{\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\left\{Z^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2\right\}^2}}, \quad (1)$$

where Z = QH = 2.14 cm is the geometrical distance used in the telescope model, while a = 1 cm, b = 2 cm and QN = 0.03 cm are the detector dimensions.

By expressing the length of QP in terms of the coordinates, we obtain

$$\bar{l} = \frac{QN}{QH} \frac{\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\left\{Z^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2\right\}^{3/2}}}{\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\left\{Z^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2\right\}^{2}}}. \quad (2)$$

Numerical evaluation of Eq. (2) using Wolfram Mathematica gives

$$\bar{l} \approx 320\,\mu m. \quad (3)$$

In deriving Eq. (3), edge effects are neglected within the analytical approximation. For comparison, the mean path length for a single detector exposed to an isotropic particle field can be calculated using Cauchy's mean-chord theorem [6],

$$\bar{l}_{single} = 4\frac{V}{S}. \quad (4)$$

For a 1 × 2 × 0.03 cm³ silicon detector, V = 0.06 cm³ and S = 4.18 cm², giving

$$\bar{l}_{single} = 574.16\,\mu m. \quad (5)$$

Geant4 Numerical Model

The numerical calculations were performed using Geant4 [1–3]. Primary particles were generated uniformly over the surface of a sphere with radius R = 150 cm surrounding the detector geometry. Their directions were sampled according to a cosine angular distribution relative to the local inward normal, providing an isotropic particle field inside the sphere. The simulation geometry was constructed with CATIA Geometry Builder [4, 5].

A total of 10^8 **primary particles** were generated. The primary particles were **^{56}Fe ions with an energy of 1 GeV/nucleon**. The numerical geometrical factor was determined from the fraction of registered events relative to the total number of generated primary particles [10, 11]:

$$G = 4\pi^2 R^2 \frac{N_{registered}}{N_{generated}}. \quad (6)$$

The mean primary-particle path length was calculated by summing the Geant4 step lengths of each primary particle inside the corresponding silicon detector. Thus, the calculated quantity represents the actual transported primary-particle trajectory rather than only the straight geometrical chord.

Two geometrical configurations were investigated. The first consists of the four Liulin-MO PIN photodiodes and is used for direct comparison with the analytical model. The second includes the complete Liulin-MO geometry together with the surrounding FREND instrument and TGO spacecraft structures. The main components included in the Geant4 model are illustrated in (Fig. 2), while examples of simulated primary-particle trajectories are shown in (Fig. 3).

The calculations were performed both without an energy threshold and with a 70 keV deposited-energy threshold in the silicon detectors. This allows the influence of the experimental selection criterion and of the surrounding spacecraft geometry on the mean primary-particle path length to be evaluated.

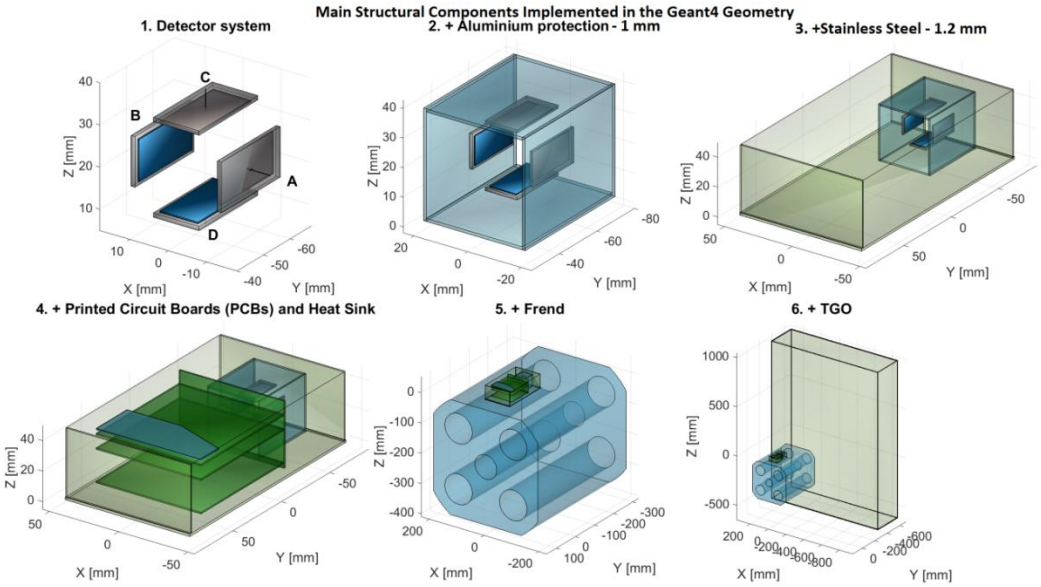


Fig. 2. Main structural components implemented in the Geant4 geometry: (1) Liulin-MO detector system; (2) aluminium protection; (3) iron protection; (4) printed circuit boards (PCBs) and heat sink; (5) FREND; and (6) TGO spacecraft

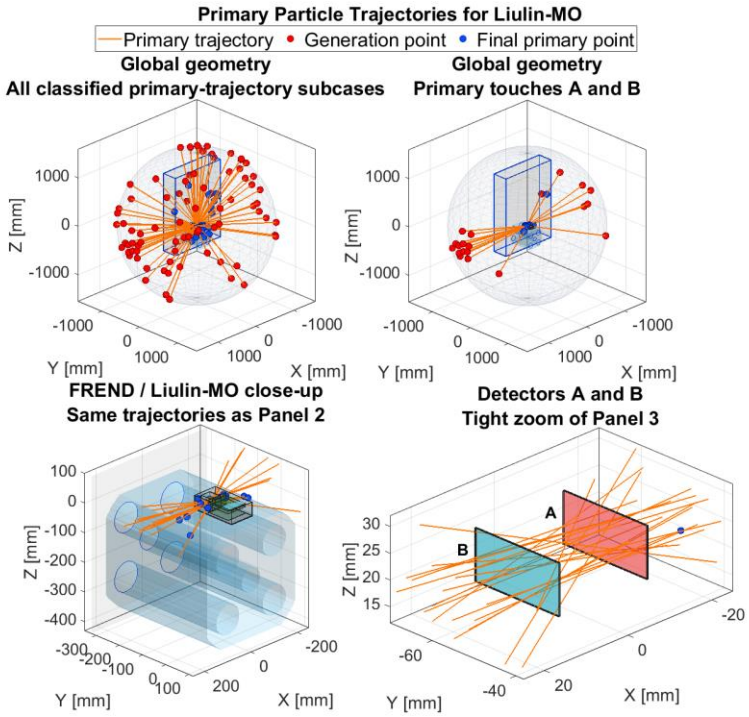


Fig. 3. Simulated primary-particle trajectories in the complete Liulin-MO + FREND + TGO geometry, from the global geometry to a detailed view of trajectories intersecting detectors A and B

Results and Discussion

For the simplified four PIN-Photodiod detector geometry without an energy threshold, the mean primary-particle path lengths are 571.42 ± 14.56 μm and 587.06 ± 19.85 μm for detectors A and B, respectively. These values are in good agreement with the analytical single-detector value of 574.16 μm. For particles crossing both telescope detectors, the corresponding mean path lengths decrease to 318.51 ± 2.99 and 316.68 ± 3.24 μm, in close agreement with the analytical telescope value of approximately 320 μm.

The reduction of the mean path length for particles crossing both detectors is a consequence of the telescope geometry. The coincidence condition restricts the range of accepted incidence angles and suppresses long paths produced by highly oblique trajectories. Consequently, the mean path length approaches the physical detector thickness of 300 μm.

Applying the 70 keV deposited-energy threshold changes the mean path lengths for the individual detectors to 629.52 and 663.68 μm, while the values for particles crossing both detectors remain practically unchanged at 318.51 and 316.68 μm. This indicates that the energy threshold modifies the broader single-detector population but has little influence on the geometrically restricted telescope population.

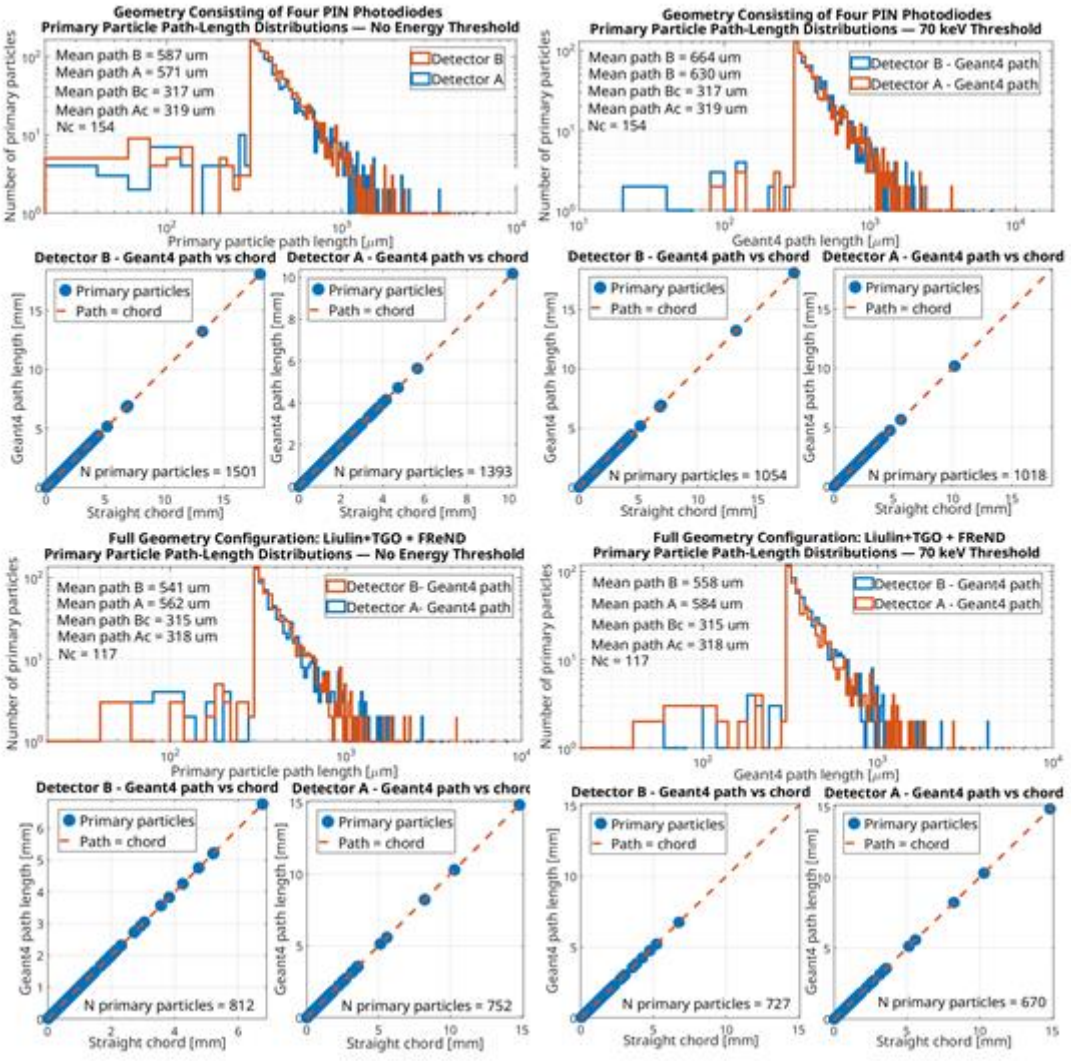


Fig. 4. Geant4 primary-particle path-length distributions and comparison between the Geant4 path length and the corresponding straight chord for the simplified four-PIN-photodiode geometry and the complete Liulin-MO + FREND + TGO geometry, without and with a 70 keV deposited-energy threshold. Ac and Bc denote the mean primary-particle path lengths in detectors A and B in coincidence mode, respectively, and Nc is the number of coincidence events.

For the complete Liulin-MO + FREND + TGO geometry, the mean path lengths without an energy threshold are 561.64 and 540.68 μm for detectors A and B. For particles crossing both detectors, the corresponding values are 317.71 and 315.01 μm. With the 70 keV threshold, the individual-detector values change to 584.39 and 558.39 μm, whereas the telescope values remain essentially unchanged. The surrounding structures therefore affect the broader population of particles reaching an individual detector, while the mean path length of particles satisfying the telescope condition remains close to the analytical value.

The comparison between the accumulated Geant4 primary-particle path and the corresponding straight geometrical chord, also shown in Fig. 4, demonstrates close agreement for most events. This confirms that the straight-trajectory approximation used in the analytical calculation is appropriate for the thin silicon detectors, while Geant4 additionally accounts for particle interactions, scattering and more complex trajectories.

For 10^8 generated primary particles and a spherical source radius of 150 cm, 154 initial trajectories intersect both telescope detectors. Using the Monte Carlo geometrical-factor expression gives $G_{MC} = 1.368\ cm^2$. The statistical uncertainty associated with the number of accepted trajectories is approximately 8.1%.

Conclusions

The analytical and Geant4 calculations show good agreement for the mean primary-particle path length in the Liulin-MO telescope. For a single silicon detector in an isotropic field, the analytical value of 574.16 μm is consistent with the numerical results. Requiring particles to cross both telescope detectors restricts the accepted angular range and reduces the mean path length to approximately 320 μm, reproduced by Geant4 within about 1%.

The 70 keV deposited-energy threshold and the surrounding Liulin-MO + FREND + TGO structures affect the mean path length of the broader single-detector particle population, but have only a small effect on particles satisfying the telescope condition. The results support the use of the analytical model and the Geant4 detector model for the interpretation of Liulin-MO measurements and for the determination of particle fluxes and dosimetric quantities.

References:

1. Agostinelli, S., J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo et al. Geant4 A simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 506, 2003, pp. 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
2. Allison, J., K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce Dubois et al. Geant4 developments and applications. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 53, No. 1, 2006, pp. 270–278. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
3. Allison, J., K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asai et al. Recent developments in Geant4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 835, 2016, pp. 186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
4. Belogurov, S., Yu. Berchun, A. Chernogorov, P. Malzacher, E. Ovcharenko et al. CATIA-GDML geometry builder. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 331, 2011, 032035. DOI: 10.1088/1742-6596/331/3/032035.
5. Belogurov, S., Yu. Berchun, A. Chernogorov, P. Malzacher, E. Ovcharenko et al. Development and application of CATIA-GDML geometry builder. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 513, 2014, 022003. DOI: 10.1088/1742-6596/513/2/022003.
6. Kellerer, A. M. Considerations on the random traversal of convex bodies and solutions for general cylinders. Radiation Research, Vol. 47, 1971, pp. 359–376.
7. Mitrofanov, I., A. Malakhov, B. Bakhtin, D. Golovin, A. Kozyrev et al. Fine Resolution Epithermal Neutron Detector (FREND) onboard the Trace Gas Orbiter. Space Science Reviews, Vol. 214, 2018, 86. DOI: 10.1007/s11214-018-0522-5.
8. Semkova, J., R. Koleva, V. Benghin, T. Dachev, Y. Matviichuk et al. Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FREND instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit. Icarus, Vol. 303, 2018, pp. 53–66. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.12.034.
9. Thomas, G. R., D. M. Willis. Analytical derivation of the geometric factor of a particle detector having circular or rectangular geometry. Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 5, 1972, pp. 260–263.
10. Yando, K., R. M. Millan, J. C. Green, D. S. Evans. A Monte Carlo simulation of the NOAA POES Medium Energy Proton and Electron Detector instrument. Journal of Geophysical Research: Space Physics, Vol. 116, 2011, A10231. DOI: 10.1029/2011JA016671.
11. Zhao, X. Y., H. Y. Wang, F. Wu, X. C. Meng, Y. Q. Ma et al. A geometric factor calculation method based on the isotropic flux assumption. Chinese Physics C, Vol. 37, No. 12, 2013, 126201. DOI: 10.1088/1674-1137/37/12/126201.

COMPUTATIONAL TOOL FOR SATELLITE SITUATIONAL ANALYSIS: CURRENT STATUS AND FUTURE HORIZONS

Atanas Atanassov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: At_M_Atanassov@yahoo.com

***Keywords**: satellite situational analysis, orbital events, time intervals determination*

***Abstract**: Satellite situational analysis involves determining the specific time intervals during which orbital conditions are satisfied to perform spacecraft operations, such as scientific experiments or data acquisition. To achieve this, the analytical framework is formulated as a Constraint Satisfaction Problem (CSP), typically encompassing multiple geometric and physical constraints. Conducting situational analysis is essential across various stages of space mission design, planning, and execution. Within this scope, two distinct yet interconnected software modules have been implemented: a program editor for task composition and a parallel situational solver for task execution, the core design principles of which are outlined in this paper. In multi-satellite constellations equipped with diverse scientific instruments, repeated situational analysis is required – particularly during the early phase of mission architecture definition – demanding substantial computational resources. To address this challenge, the developed software tool is parallelised and incorporates dynamic heuristic approaches to enhance computational efficiency. Finally, the performance of the situational solver is illustrated through the resolution of specific situational tasks governing the management of a satellite power subsystem and multiple payloads.*

ИЗЧИСЛИТЕЛЕН ИНСТРУМЕНТ ЗА СПЪТНИКОВ СИТУАЦИОНЕН АНАЛИЗ: ТЕКУЩО СЪСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВИ

Атанас Атанасов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: At_M_Atanassov@yahoo.com

***Ключови думи:** спътников ситуационен анализ, орбитални събития, определяне на времеви интервали*

***Резюме:** Спътниковият ситуационен анализ се занимава с определяне на времеви интервали, които са подходящи за провеждане на операции/активности свързани с добив на данни/информация необходими за решаване на конкретна научна или технологична задача. За целта се решават задачи от типа „задача изпълнение на ограничения“. Броят на ограниченията е едно или няколко. Извършването на ситуационен анализ е от съществено значение на различни етапи от подготовката и реализацията на космическите мисии.*

За извършване на спътников ситуационен анализ са разработени два отделни, но взаимно свързани инструмента – единият, редактор за създаване на модели на ситуационните задачи и ситуационен процесор за тяхното решаване. В доклада са разгледани основните принципи за изграждане на двата инструмента. При космически мисии с голям брой спътници, научни инструменти и научни задачи, се налага многократно извършване/провеждане на ситуационен анализ, особено на началните етапи от подготовката на космическите мисии. Това налага изразходването на значително количество изчислителни ресурси. За тази цел, разработеният програмен инструмент е паралелизиран и включва евристични подходи за увеличаване на изчислителната ефективност.

Работата на ситуационния процесор е илюстрирана чрез решаване на ситуационни задачи, имащи отношение към управлението на енергийна спътникова подсистема и няколко инструмента.

Introduction

Computer simulations are utilised to clarify various aspects related to satellite orbital motion, the design and functional parameters of space and ground-based subsystems, and payloads at different stages of space mission preparation. This analysis falls under a distinct scientific field within space research known as Space Mission Analysis and Design (**SMAD**) [1]. Situational analysis (**SA**) is a crucial component of **SMAD**, determining time intervals or specific moments when conditions are suitable for conducting satellite operations or other orbital events.

The Parallel Situational Analysis Solver is currently under development at the Space Research and Technology Institute of the Bulgarian Academy of Sciences (BAS) [2]. Individual stages in the solver's development are presented in [2-8]. This paper presents an application of the situational solver in simulating the operation of several instruments.

Problem formulation

Situational analysis investigates and establishes whether the conditions required to perform satellite operations (such as measurements, experiments, communications, or space debris close-approach risks) are met during orbital motion. A single situational task ST may comprise one or more conditions sc:

(1) $$ST = sc_1 \wedge sc_2 \wedge \ldots \wedge sc_n = \bigwedge_1^n sc_i,$$

The conditions sc_i are predicate functions that evaluate to either true or false. Generally, they can be represented as:

$$sc_i = sc_i\left(\{\vec{R}\}, \{\alpha\}, \{\beta\}, t\right)$$

where $\{\vec{R}\}$ is the set of radius vectors of the objects, $\{\alpha\}$ is the set of parameters of the mathematical model describing the situational condition, and $\{\beta\}$ is the set of specific constraints. Within this formulation, solving a situational problem involves verifying the feasibility of logical functions at appropriate (or equidistant) instants of time t.

Program Editor for Situational Problem Composition

This editor is used to define, formulate and compose situational tasks. This process is based on previously developed and programmatically implemented models of situational conditions. To implement this editor, a **dialogue box** incorporating various controls is used for selecting and entering the parameters of the situational conditions. Depending on the type of space mission, a **list control** provides a corresponding set of situational conditions. Based on the selected conditions, the respective parameters $\{\alpha\}$ and constraints $\{\beta\}$ are displayed on the **dialogue box** by **static text controls**, allowing their values to be entered into **edit controls**. Input validation is applied to the entered values based on the domains defined for each parameter and constraint during the development of the respective situational condition. This prevents the entry of incorrect values and mitigates runtime program errors.

Auxiliary tools (implemented via **push-buttons**) have been developed to modify the sequence of situational conditions within a situational task or to remove a previously entered condition. Once the respective parameter values and constraints are configured, individual conditions, tasks, or sets of tasks can be saved for future use. When defining situational tasks for multi-satellite missions, a task can be assigned to either an individual satellite or the entire constellation. This capability is essential for heterogeneous missions, where distinct satellites perform specific functions.

Once the definition of the situational tasks for a given mission is complete, several critical operations are performed:

- The number of threads required to instantiate the parallel situational solver is entered into edit controls, and the solver itself is instantiated before exiting the dialog. A dedicated subroutine generates these threads, alongside two event objects per thread, which are utilized to synchronise the threads with the parent process. The handles for both the threads and the synchronisation events are stored within a two-dimensional array representing the solver's configuration parameters. Additionally, a global synchronisation event is created to manage inter-thread coordination when fetching the next situational task or group of tasks for processing. The number of situational tasks fetched concurrently is determined by the "granularity" parameter, the value of which is configured alongside the thread count.
- Prior to exiting the main subroutine of the situational editor, all solver control parameters (such as the thread count and solver configurations) along with the situational task data are passed via a global data area (common area) to a wrapper subroutine, which serves as the entry point

for the solver's threads. By utilizing different wrapper subroutines – the names of which are passed to the thread-creation subroutine and are essential for instantiating the threads themselves - various configurations of the situational solver can be implemented.

- All solver parameters and memory addresses containing the situational tasks, along with the satellite coordinate addresses (and other data), are recorded into a specific derived data type structure. This structure is subsequently passed to a subroutine possessing polymorphic properties. This universal subroutine registers solver descriptors into specific groups or "layers", reflecting the comprehensive architecture of space mission simulation models as a "System of Systems". The resulting descriptor contains all the necessary situational task data concerning a specific space mission. It is utilized both by the editors of other solvers to build interfaces between different interdisciplinary models within a multiphysics software environment, and by the simulation model interpreter for a given space mission.

Parallel Situational Solver

The development of the situational solver originated from a serial codebase, which was subsequently parallelised using the thread pool programming model [9]. This specific programming model was selected due to the following factors:

- **Irregular workloads:** The mathematical models governing various situational conditions are inherently non-uniform, leading to irregular computations. In certain scenarios, these irregularities arise within the situational conditions themselves at specific segments of the satellite trajectory; for instance, verifying whether a satellite is in a sunlit region, the Earth's shadow (umbra), or penumbra requires varying numbers of processor operations.
- **Memory latency:** The spatial allocation of data required to solve situational tasks within the address space (such as satellite coordinates and task parameters) can lead to non-uniform memory latencies during data retrieval, causing processor stalls. These processes are inherently dependent on the underlying processor architecture and the operating system.
- **Load balancing:** To prevent system overload and mitigate resource constraints, it is recommended that the number of threads within the pool does not exceed the total number of available CPU cores. This restriction is crucial, as an additional master thread is dedicated to managing the simulation loop.

Consequent to these challenges, the thread pool model provides dynamic scheduling of computations to achieve maximum efficiency and optimal hardware utilisation. In practice, this model was further developed by incorporating synchronisation mechanisms with the parent thread (which controls the overall simulation loop) and mitigating potential race conditions. Furthermore, the solver management logic utilizes the "granularity" parameter to dispatch a predefined number of situational tasks to available worker threads. When the remaining unsolved tasks fall below this threshold, the available threads dynamically shift to fetching tasks individually.

To coordinate the thread pool operation, a universal subroutine is invoked by the solver's wrapper subroutines. This subroutine exhibits polymorphic properties, enabling it to be invoked with varying actual parameters tailored to the specifications of the different solvers that utilize it. The entry point of the main solver subroutine is encapsulated within the wrapper subroutine; it is passed to the thread pool management subroutine, which subsequently executes the core algorithm that processes the situational tasks. From an algorithmic perspective, this core subroutine operates as a finite-state machine that accepts an ordered set of situational conditions as an input tape for a given situational task. Each situational condition possesses a unique identifier, which dictates the invocation of the corresponding subroutines responsible for evaluating those specific conditions.

Examples of Implemented Situational Conditions

At this stage of development, several models for specific situational conditions have been formulated and programmatically implemented within the parallel solver framework. Algorithms have been developed to precisely determine the boundaries (start and end points) of the target time intervals during which these situational conditions are satisfied. To achieve this high precision, the solver retains the state vectors from the last few preceding time steps, alongside the satellite coordinates calculated at the end of the current integration step. These state vectors serve as interpolation nodes. Consequently, interpolation within the bounds of the final orbital integration step is utilized to accurately pinpoint the entry and exit instants of the intervals.

The implemented situational conditions include algorithms to determine the time intervals during which a satellite is positioned:

- **Subject to spatio-temporal conditions** [3]: These apply to a pair of satellites traversing the same spatial region with a time variance Δt that is strictly less than a characteristic timeframe τ associated with the physical process under investigation.
- **Outside the moonlit segment** of the orbit [4].
- **Within the Earth's shadow (umbra) or the sunlit region** [5]: Both scenarios utilize a conical model of the Earth's shadow, with an additional verification layer to detect transitions through the penumbra.
- **Within a high-risk close-approach zone** [6]: These conditions are developed to detect potential conjunctions and close approaches between active satellites, as well as between satellites and space debris.
- **Within the line-of-sight (radio visibility) zone** of a designated ground station [7].
- **In close angular proximity to the Sun:** This addresses Sun outage scenarios for a communicating satellite pair, verifying whether the transmitting satellite falls within a narrow angular separation from the Sun as viewed by the receiver.
- **Above a circular segment of the Earth's surface**, defined by specified coordinates for its centre $((\varphi, \lambda))$ and an angular radius Θ.

Efficiency Enhancement via Dynamic Heuristic Reordering

According to Equation (1), the primary objective is to determine the time intervals during which all situational conditions are simultaneously satisfied. Conversely, the complementary problem $\overline{SP}$ can be formulated to identify the time intervals where at least one condition is violated:

(2) $$\overline{ST} = \overline{sc(t)_1} \vee \overline{sc(t)_2} \vee \ldots \vee \overline{sc(t)_k} \vee \ldots \vee \overline{sc(t)_n}$$

To satisfy this complementary formulation, it is sufficient for just a single condition $\overline{sc(t)_k}$ to evaluate to $\boldsymbol{true}$ (meaning the original condition $sc(t)_k$ is violated). Once a specific k-th condition is identified as sufficient to satisfy the negative task state $\overline{sc(t)_k} = true$, the evaluation sequence for subsequent time steps can be optimized by applying the following reordering heuristic [8]:

(3) $$\overline{ST} = \overline{sc(t+\triangle t)_k} \vee \overline{sc(t+\triangle t)_1} \vee \ldots \vee \overline{sc(t+\triangle t)_{k-1}} \vee \overline{sc(t+\triangle t)_{k+1}} \vee \ldots \vee \overline{sc(t+\triangle t)_n}$$

The underlying rationale for this reordering stems from the fact that situational conditions are slowly varying functions relative to the simulation model's temporal discretization step Δt. Consequently, shifting the previously unfulfilled $\boldsymbol{k}^{-th}$ condition to the first position in the evaluation queue allows the solver to trigger a short-circuit

Precise Determination of Time Interval Boundaries

In space mission simulations, the numerical integration of satellite equations of motion is executed using a discrete temporal step Δt. To ensure computational efficiency, this step typically ranges from tens of seconds to a minute or more, during which low-Earth orbiting satellites significantly alter their spatial positions. During situational analysis, the parameters $\alpha(t)$ governing the situational task conditions are evaluated. If the integration steps are substantial, the variations in these parameter values can also be significant. Consequently, evaluating the situational conditions solely at the discrete integration steps where the state vectors are solved, $SP(\alpha(t))$, can introduce considerable boundary errors when defining the start and end boundaries of the target intervals Δt^*. The actual entry and exit instants of these intervals reside somewhere within the bounds of the current integration step. Crucially, when $\Delta t^* < \Delta t$, an entire interval may be omitted entirely. This risk is particularly pronounced in high-precision tasks such as detecting equatorial or terminator crossings (the boundary dividing the sunlit and shadowed regions of the Earth) or analysing close-approach conjunctions between satellites and space debris.

To precisely isolate these intervals Δt^*, two distinct interpolation-based approaches have been developed, utilizing Lagrange interpolation [10] to approximate satellite coordinates and situational parameters at arbitrary instants within the integration step Δt. In the first method, the interval onset t^*_{start} is detected when the evaluated state of the situational task changes from $\boldsymbol{false}$-to-$\boldsymbol{true}$ across two consecutive steps, $ST(\alpha(t))$ and $ST(\alpha(t + \Delta t))$. Without refinement, the boundary defaults to $t^*_{start} = t + \Delta t$. Analogously, the interval termination t^*_{final} is identified via a $\boldsymbol{true}$-to-$\boldsymbol{false}$ transition, defaulting to $t^*_{final} = t$. The boundary refinement is executed iteratively by selecting successive sub-steps t_j within the window $(t, t + \Delta t)$ and evaluating $ST\left(\alpha(t_j)\right)$. This convergent iterative loop

terminates when $|t_{j+1} - t_j| < tol$, where tol defines the user-specified tolerance for boundary precision. The inherent limitation of this baseline approach remains its susceptibility to missing short-duration intervals where $\Delta t^* < \Delta t$.

The second method addresses this limitation by actively monitoring the mathematical trends of the parameters $\alpha(t)$ relative to their respective operational constraints β. Numerical differentiation is applied to evaluate the first derivatives of $\alpha(t)$ to detect inflection points or local extrema. A sign change in the derivative (e.g., from negative to positive) serves as a predictive indicator that triggers a deep search for a hidden interval Δt^*, even when $\Delta t^* < \Delta t$. Once triggered, root-finding algorithms are deployed within the macro step Δt, combining standard bisection techniques with specialized refinement heuristics. This iterative refinement process continues until convergence is reached. This advanced approach has been successfully implemented to resolve high-risk satellite close approaches (conjunctions) [7] and short-duration passes through the line-of-sight radio visibility zones of ground tracking stations.

Application Example

To illustrate the operation of the situational solver, several situational tasks required to manage two scientific instruments are solved. These instruments are defined as two cameras: one operating in the visible spectrum to observe the Earth's surface within the sunlit segments of the orbit, and the other operating in the infrared spectrum within the Earth's shadow. Two circular segments on the Earth's surface, Θ_1 and Θ_2, are selected with geographical coordinates and angular radii configured as $(33°, 1°, 9°)$ and $(66°, 1°, 9°)$, respectively.

Within the computer simulation, the situational task ST_1 is solved using a single condition, $sc_{1,1}$, which verifies whether the satellite is positioned in the sunlit part of its trajectory. This step is necessary to simulate electrical power generation from the solar arrays. To simulate the operation of the visible-spectrum instrument when the satellite traverses either Θ_1 or Θ_2, two situational tasks are evaluated, each comprising two conditions: $ST_2 = sc_{2,1} \wedge sc_{2,2}$ and $ST_3 = sc_{3,1} \wedge sc_{3,2}$. The conditions $sc_{2,1}$ and $sc_{3,1}$ verify proximity to Θ_1 and Θ_2, respectively. The conditions $sc_{2,2}$ and $sc_{3,2}$ are identical and check if the satellite remains within the sunlit segment of the orbit.

The second instrument operates based on the results of two situational tasks, each containing three conditions: $ST_4 = sc_{4,1} \wedge sc_{4,2} \wedge sc_{4,3}$ and $ST_5 = sc_{5,1} \wedge sc_{5,2} \wedge sc_{5,3}$. The primary conditions, $sc_{4,1}$ and $sc_{5,1}$, correspond to the regions Θ_1 and Θ_2, while the secondary conditions, $sc_{4,2}$ and $sc_{5,2}$, verify if the satellite is within the Earth's shadow. The tertiary conditions, $sc_{4,3}$ and $sc_{5,3}$, check if the Moon is below the satellite's horizon to ensure the absence of lunar light pollution. Figure 1 illustrates the time-sequence diagrams representing the solutions to these described situational tasks.

For the purpose of this demonstration, the satellite's orbital parameters are defined as follows: semi-major axis $\boldsymbol{a} = 7{,}200{,}000$ m, eccentricity $\boldsymbol{e} = 0.001$, inclination $\boldsymbol{i} = 0.0°$, right ascension of the ascending node $\boldsymbol{\Omega} = 0.0°$, and argument of perigee $\boldsymbol{\omega} = 0.0°$.

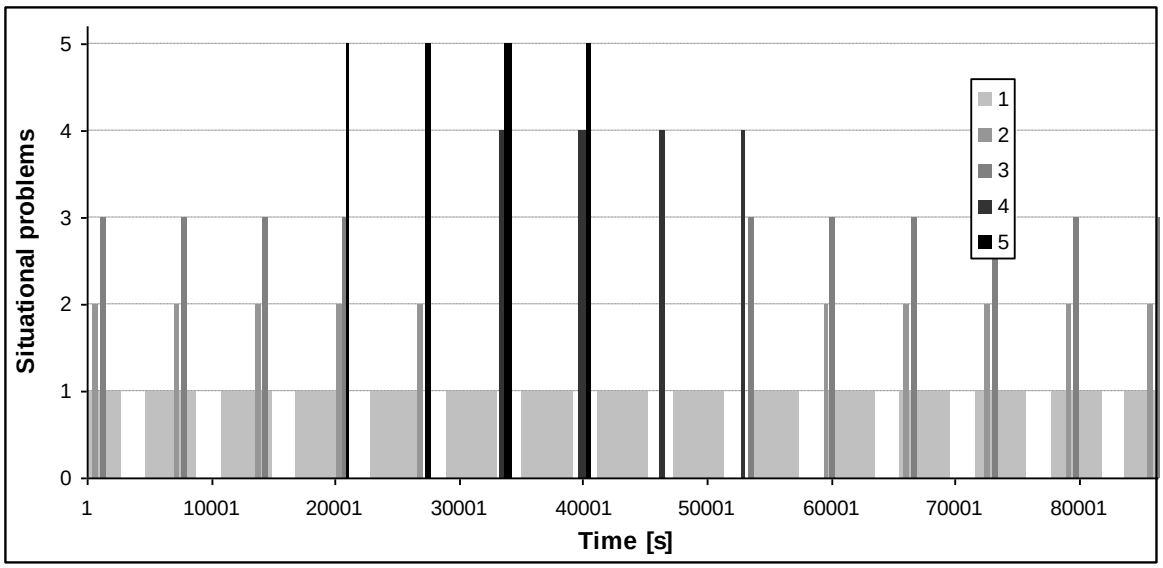


Fig. 1. Time-sequence diagrams representing the solutions to the five described situational tasks over a 24-hour period

To evaluate the efficiency of the dynamic heuristic reordering, two separate analyses of the configured situational tasks were conducted: one utilizing a static condition sequence and another applying the dynamic heuristic reordering strategy. The total number of evaluated situational conditions was **65,153** for the static approach and **44,342** for the dynamically reordered execution. It should be noted that in the static baseline scenario, the total count of evaluated conditions heavily depends on their initial arrangement and the relative position of the specific condition that most frequently triggers the evaluation short-circuit within the queue. Furthermore, beyond this queue positioning, the computational workload is inherently dictated by the physical nature of the situational conditions and the probability density of their fulfillment (or violation) across the simulated time horizon.

Conclusion and Future Work

This paper has presented a comprehensive description of software tools designed for modelling and solving situational tasks. Specifically, the parallel solver is tailored to handle large-scale problems by exploiting multi-core processors within shared-memory computing systems. To further optimize performance, a heuristic approach has been implemented, significantly enhancing computational efficiency when solving multi-condition situational tasks. Additionally, two distinct methods have been developed to improve the positioning accuracy for the entry and exit instants of the time intervals.

Future developments for the situational editor include introducing features for re-evaluating and modifying individual situational tasks, such as altering specific condition parameters or constraints, removing existing entries, and appending new ones. Regarding the parallel situational solver, subsequent work will focus on expanding the library of situational conditions through the formulation and programmatic implementation of new mathematical models.

References:

1. Wertz, J.R., Larson, W.J., Space Mission Analysis and Design. Microcosm Press, Kluwer Academic Publishers, third ed., 1999
2. Atanassov, A.M., Parallel satellite orbital situational problems solver for space missions design and control. *Advances in Space Research*, *58*(9), 2016, pp.1819–1826.
3. Atanassov, A.M., Situation Analysis Based on Spatiotemporal Situation Conditions, *Proceedings of SES.* 2016, 2017, pp. 47–51.
4. Atanassov, A., AN APPLICATION OF THE SITUATIONAL SOLVER TO PROBLEMS CONTAINING CONDITION RELATED TO VISIBILITY OF THE MOON BY A SATELLITE. *Proceedings of SES*, 2022, pp.62–67.
5. Atanassov, A., Applying a Situational Analysis Solver to Problems Involving Umbra/Sunlit Model. C. R. Acad. Bulg. Sci., v76, №7, 2023, pp. 1054 – 1064.
6. Atanassov A.M., APPLYING PARALLEL SITUATIONAL ANALYSIS SOLVER TO SATELLITE – SPACE DEBRIS CLOSE APPROACH PROBLEMS. ALGORITHMS AND SUBROUTINES. Aerospace Research in Bulgaria, 2025, 37, pp. 16–29.
7. Atanassov, A. M., ACCURATE DETERMINATION OF THE BOUNDARIES OF THE INTERVALS IN WHICH SITUATIONAL CONDITIONS ARE FULFILLED. ALGORITHM AND SUBROUTINES. Proceedings SES 2025, SRTI, BAS, ISSN:p-ISSN 2603 – 3313 e-ISSN 2603 – 3321, 2025, pp. 25–32
8. Atanassov, A.M., Efficiency Enhancement of Situational Analysis for Space Mission Design Using Reordered Heuristics, C. R. Acad. Bulg. Sci. v. 79(5), 2026, pp. 615–623.
9. Rauber, T., Rünger G., 2010. Parallel Programming: For Multicore and Cluster Systems. Springer.
10. Кальницкий, Л.А., Добротин, Д.А., Жевержеев, В.Ф., and Сапогов, Н.А., Специальный курс высшей математики для втузов, 1976.

MULTIPHYSICS MODELLING AND SIMULATION FRAMEWORK FOR SATELLITE MISSIONS: CURRENT STATUS AND FUTURE PROSPECTS

Atanas Atanassov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: At_M_Atanassov@yahoo.com

Keywords: *Space Mission Analysis and Design, multi-satellite mission, space mission federation,* system of heterogeneous multi-satellite *missions*, *functional models of scientific instruments*

Abstract: *The space sector is rapidly evolving from single, massive satellites to multi-satellite systems. This architectural shift presents itself in two primary forms: satellite constellations, which are homogeneous (or heterogeneous) fleets comprising satellites with varying instruments, masses, dimensions, power requirements, and information and communication needs under a single operator; and Federated Satellite Systems (FSS), which share resources to achieve collaborative goals.*

Designing and managing these highly complex, orbital systems makes advanced computer modelling and simulation indispensable. Traditional design paradigms are no longer sufficient to handle the scale, tight subsystem coupling, and real-time operational constraints. Looking forward, the next frontier in aerospace engineering relies heavily on the development of unified, interdisciplinary simulation frameworks. By bridging diverse domains – such as orbital mechanics, thermal dynamics, telecommunications, and power systems – these frameworks enable comprehensive space mission validation. Simultaneously, the massive scale of distributed space systems generates exponential computational challenges at different stages of mission preparation. Resolving these bottlenecks requires highly efficient, parallel algorithms.

Within the framework of the space mission modelling and simulation environment currently under development, tools are being created to model and simulate various service subsystems and scientific instruments. The interconnections between the power subsystem, comprising solar panels and batteries, and several instruments are illustrated. An interface has been developed between these two types of models (the power system and the instruments), demonstrating the overall power consumption of the scientific instruments.

МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНА ПРОГРАМНА СРЕДА ЗА МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИИ НА СПЪТНИКОВИ МИСИИ: ТЕКУЩО СЪСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВИ

Атанас Атанасов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: At_M_Atanassov@yahoo.com

Ключови думи: *анализ и проектиране на космически мисии, много-спътникови мисии, системи от хетерогенни много-спътникови мисии, функционални модели на научни инструменти*

Резюме: *Космическият сектор се развива бързо от единични, масивни спътници към многоспътникови системи. Тази архитектурна промяна се проявява в две основни форми: спътникови съзвездия, които представляват хомогенни (или хетерогенни) групировки, състоящи се от спътници с различни инструменти, маси, размери, енергийни изисквания, както и информационни и комуникационни нужди под управлението на един оператор; и Федеративни спътникови системи (FSS), които динамично споделят ресурси между множество оператори за постигане на съвместни цели.*

Проектирането и управлението на тези силно комплексни орбитални системи прави съвременното компютърно моделиране и симулации абсолютно необходими. Традиционните парадигми за проектиране вече не са достатъчни, за да се справят с мащаба, тясната свързаност между подсистемите и оперативните ограничения в реално време. Поглеждайки напред, следващото предизвикателство в космическото инженерство разчита в голяма степен на разработването на единни, интердисциплинарни симулационни среди. Чрез свързването на различни области – като орбитална механика, термодинамика, телекомуникации и енергийни системи – тези среди позволяват

цялостен анализ на космическите мисии. Същевременно, огромният мащаб на разпределените космически системи генерира експоненциални изчислителни предизвикателства на различните етапи от подготовката на мисията. Разрешаването на тези тесни места изисква високопроизводителни, паралелни алгоритми.

В рамките на развиващата се в момента програмна среда за моделиране и симулации на спътникови мисии се създават инструменти за моделиране и симулация на различни служебни подсистеми и научни инструменти. Илюстрирани са взаимовръзките между енергийната подсистема, състояща се от слънчеви панели и батерии, и няколко инструмента. Разработен е интерфейс между тези два типа модели (енергийната система и инструментите), който нагледно демонстрира общата консумация на енергия от научните инструменти.

Introduction

Recently, various organisations have been planning or implementing the deployment of multi-satellite missions [1, 2]. **Distributed Space Systems** (**DSS**) are developed for diverse purposes, including communication, Earth observation, and geophysical studies (such as Earth and planetary sciences, astronomy, on-orbit servicing, and space situational awareness). The development of such missions covers a wide range of aspects. These span from the required geometry (orbital parameters and, in some cases, the deployment and transition into operational modes) necessary to implement the core concepts, to the optimization of satellite subsystems, individual instruments, the ground segment (control centres and communication), and management software, including operation planning. Selva et al. present a detailed survey of the past, present, and future of **DSS** [3].

Computer software is utilized at various stages, from the preparation to the execution of space missions, with different aspects being simulated to meet ever-increasing requirements. It is important to note that alongside well-known commercially distributed software (such as STK, FreeFlyer, and ASTOS) or open-source alternatives (like GMAT), certain organisations develop proprietary software to address specific needs. Some of these in-house programs extend beyond satellite dynamics simulations [4–7]. While Wertz and Larson suggest using flight-proven software developed and supported by specialized companies, they also highlight that developing proprietary programs allows for a deeper understanding of the underlying challenges [8]. Furthermore, Chagas emphasizes the importance of applying a comprehensive set of modelling and simulation toolkits to develop complex space missions [9]. Ultimately, employing multi-physics environments is crucial to addressing the complex challenges inherent in space mission design [10].

At the Space Research and Technology Institute of the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS), algorithms and software are being developed across various fields related to modelling and simulation. These efforts encompass predicting the motion of multi-satellite systems [11], situational and event analysis [12], functional modelling, and simulating the operations of satellite subsystems and scientific instruments. Recently, research and development have focused on the concept and creation of an interdisciplinary software environment designed for modelling and simulating the behaviour and functionality of multi-satellite missions.

Problem formulation

A concept is being developed for an interdisciplinary software environment dedicated to the modelling and simulation of multi-satellite missions and mission federations operating within near-Earth space. To achieve this, tools are being designed to model various core objects, including space missions, situational events, satellite subsystems, and scientific instruments. Computational instruments and solvers are also being developed to simulate the functionality of these objects.

The software environment under development enables the creation of structurally complex "**System of Systems**" (**SoS**) models. The architecture of these models comprises several distinct layers:

- **Multi-satellite missions:** The highest structural layer, utilized to build models of individual missions and mission federations. It also incorporates models of space debris as an integral part of the space environment in which the satellite missions operate.
- **Space environment:** Computes various model parameters along the satellites' orbits, encompassing both geometric characteristics and environmental properties (such as the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere).
- **Situational and event analysis:** Determines the specific time windows suitable for executing satellite operations by solving diverse situational tasks. These tasks are geometric and physical in nature. They are resolved within the scope of an individual mission or federation, or they address proximity evaluations regarding "close encounters" with a member of a given population of space debris.

- **Satellite subsystem modelling:** Focuses on subsystem models, which encompass the Electrical Power Subsystem (EPS), Attitude Determination and Control Subsystem (ADCS), Thermal Control Subsystem (TCS), On-Board Computer and Data Handling Subsystem (OBC/CDHS), Communication Subsystem (Direct-to-Earth (DTE) and Inter-Satellite Links (ISL)).
- **Scientific instrument modelling:** Investigates and creates models for different types of scientific instruments, categorized according to the specific space missions in which they are deployed. Functional models are developed for various instruments based on their operational modes.
- **Dynamic scene modelling:** Develops fundamental models of dynamic scenes used to simulate satellite dynamics within space missions (rendered on a two-dimensional map of the Earth's surface or a three-dimensional representation of the Earth). At this stage, the future development of graphical representations for simulation results related to scientific instrument operations is under consideration.
- **Multiscale modelling:** Develops methods to simulate key features of space missions or individual elements across multiple scales of time and/or spatial resolution.

Depending on the layer to which a given model belongs, specific interfaces are developed to connect it with models from other layers. These interfaces are utilized both during the model composition phase and by the simulation model interpreter during runtime. Furthermore, various software tools and editors are continuously being developed to construct objects based on these models, which themselves undergo ongoing refinement. To simulate the behaviour of the compiled interdisciplinary models, corresponding computational solvers are also being actively designed and advanced.

Software Editor for Compiling Scientific Instrument Models

The configuration, definition, and integration of **Scientific Instrument** (**ScI**) models are managed via the **Scientific Instruments Models Composition Editor** (**ScIMCE**). The **ScIMCE** leverages a library of pre-developed and programmatically implemented payload models. Operationally, the editor employs a dedicated **dialogue box** equipped with diverse controls to select and specify instrument-related parameters. A contextual **list control** presents available instruments tailored to the specific nature of the space mission. Once a particular **ScI** is selected for modelling, its associated parameters are populated via **static text** fields, enabling users to enter data through dedicated **edit controls**. To safeguard against execution errors and block invalid inputs, real-time data validation is enforced based on predetermined parameter domains. Within multi-satellite architectures, the compiled suite of instrument models can be allocated either to a specific satellite or across the entire constellation. This flexibility is vital for heterogeneous missions, where individual space assets are tasked with distinct operational roles.

To construct the scientific instrument models, a structured variable based on a derived data type is utilized, as delineated in Figure 1: The scientific instrument models allocated to a single satellite are stored within an individual column of a two-dimensional array. Consequently, the instrument models for an entire mission are mapped onto an 2D array. The number of columns, M, corresponds directly to the total satellite count. The number of elements within each column, N, is defined by the maximum number of instruments carried by any single satellite within a heterogeneous mission (where different satellites are equipped with diverse payloads and functionalities). Each column incorporates a dedicated zeroth element, which registers the specific instrument count for that individual satellite.

Upon concluding the definition and composition of the **ScI** configuration for a specific space mission, several critical operations are executed:

- The number of threads required to instantiate the **Parallel Scientific Instruments Functionality Simulation Solver (PScIFSS)** is entered into **edit controls**, and the solver itself is instantiated before exiting the dialog. A dedicated subroutine generates these threads, alongside two event objects per thread, which are utilized to synchronise the threads with the parent process. The handles for both the threads and the synchronisation events are stored within a two-dimensional array representing the solver's configuration parameters. Additionally, a global synchronisation event is created to manage inter-thread coordination when fetching the next ScI simulation task or group of such tasks for processing. The number of situational tasks fetched concurrently is determined by the "granularity" parameter, the value of which is configured alongside the thread count.

```
type     satellite_payload ! Tuk se sadarja komplekt ot instrumenti za edin spatnik
  sequence
 UNION
  MAP                    ! Zero element - for control
    character  sat_title*20          ! Satellite name
    integer    sat_id                ! Satellite identification code
    integer    num_instruments       ! Number of instruments disposed on the satellite
  END MAP
  MAP                    ! For next element- description of instruments
    character  instrument_type*32
    character  instrument_name*16
    integer    instr_code            ! Identification code of instrument type
    integer    num_attributes
    real         attributes(1:10)
    logical    situation             ! .true.- instrument depend from some situations-
    integer      id_sit_prob(0:10)   ! serial number of sit.task in all sit.tasks
  END MAP
 END UNION
end type  satellite_payload
```

Fig. 1. Derived data type structure for modelling satellite payloads

- Thread allocation and instantiation: The desired thread count required to initialize the **PScIFSS** is inputted via dedicated **edit controls**, allowing the solver instance to be generated prior to closing the **dialogue box**. A specialized subroutine is invoked to spin up these threads, creating two distinct event objects per thread to facilitate synchronization with the main parent process. The handles for both the execution threads and their corresponding synchronization events are catalogued within a two-dimensional configuration array. Inter-thread orchestration is further managed by a global synchronization event, which coordinates the safe fetching of instrument operational payloads or data blocks during runtime. The volume of data fetched simultaneously by the threads is regulated by a "granularity" parameter, configured concurrently with the execution thread count.
- **Pool of thread creation** Thread allocation and instantiation: The desired thread count required to initialize the **Parallel Scientific Instruments Functionality Simulation Solver** (**PScIFSS**) is inputted via dedicated **edit controls**, allowing the solver instance to be generated prior to closing the **dialogue box**. A specialized subroutine creates these threads and also creates two event objects per thread to facilitate synchronization with the main parent process. The handles for both the execution threads and their corresponding synchronization events are catalogued within a two-dimensional array. Inter-thread orchestration is further managed by a global synchronization event, which coordinates the safe fetching of instrument operational payloads or data blocks during runtime. The volume of data fetched simultaneously by the threads is regulated by a "granularity" parameter, configured concurrently with the execution thread count.
- Prior to exiting the **PScIMCE**, all solver control parameters (such as the thread count and solver configurations) along with the **ScI** data parameters are passed via a global data area (common area) to a wrapper subroutine, which serves as the entry point for the solver's threads. By utilizing different wrapper subroutines - the names of which are passed to the thread-creation subroutine and are essential for instantiating the threads themselves – various configurations of the **PScIMCE** can be implemented.
- All solver parameters and memory addresses containing the **ScI** model parameters, along with the satellite coordinate addresses (and other data), are recorded into a specific derived type structure. This structure is subsequently passed to a subroutine „**add_object**“ possessing polymorphic properties (Fig. 2). This universal subroutine registers solver descriptors into specific groups or "layers", reflecting the comprehensive architecture of space mission simulation models as a **SoS**. The resulting descriptor contains all the necessary situational task data concerning a specific space mission. It is utilized by the simulation model interpreter for a given space mission.

```
common    /c_Payload/num_payloads, ES_payload_adr

ScI_Payload%kind_Payload    = 3              ! 3 - for (Sc)ientific(I)nstruments
ScI_Payload%name            = IVP_par(kod_IVP)%name//"\Instruments"      ! take the name of IVP
ScI_Payload%IVP_index       = kod_IVP    ! serial number of IVP - for satellites coordinates
ScI_Payload% AS_index       = num_AIs    ! Solver's parameters – for interpreter
ScI_Payload%adr_instruments= instrument_descriptor_adr

 CALL add_object(num_payloads, Payload_descriptor_adr        = ScI_payload_adr, &
                                Payload_descriptor_adr_new= ScI_payload_adr, &
                                                level__45= ScI_Payload);
```

Fig. 2. Preparation of the layer descriptor for functional simulations of satellite subsystems and scientific instruments

The total count of all objects within the layer designated as "**level__45**", which encompasses all service subsystems and scientific instrument models, is stored in the **num_payloads** variable. The memory address of this descriptor is recorded in the second position. The variable **kind_Payload** indicates the object type, which is set to 3 for scientific instruments; specifically, this parameter holds a value of 1 for the electrical power subsystem. Furthermore, the **AS_index** variable specifies the sequential index of the thread pool required to start the **PScIFSS** solver. This data is systematically utilized by the simulation model interpreter during runtime.

Parallel Scientific Instruments Functionality Simulation Solver

The **PScIFSS** under development is based on a well-established model previously applied to other computational tools within different layers of the architecture discussed above. Implementing this model is highly appropriate due to the following reasons:

- Computational parallelisation: This is necessitated by the design focus of the software environment, which is tailored for modelling and simulating the functionality of high-dimensional, heterogeneous objects. The large satellite count within a single mission, coupled with the complex models compiled for utility subsystems and scientific instruments, demands significant computational resources. The partitioning of the global computational workload into discrete subtasks is achieved through "**parallelism across the system**", where each thread from the pool executes calculations for an individual satellite. Heterogeneous mathematical models inherently result in irregular computations; these are processed efficiently on multi-core processors by implementing dynamic scheduling based on a "**pool of threads**" programming paradigm [13].
- The entry point of the main **PScIFSS** subroutine is encapsulated within the **wrapper subroutine**; it is passed to the thread pool management subroutine, which subsequently executes the core algorithm that processes the **ScI** models. From an algorithmic perspective, this core subroutine operates as a finite-state machine that accepts an ordered set of situational conditions as an input tape for a given situational task. Each situational condition possesses a unique identifier, which dictates the invocation of the corresponding subroutines responsible for simulating specific **ScI** models.
- **Development of universal utilities:** A unified subroutine is utilized to initialize all solver instances, regardless of whether they employ a single thread or multiple threads. Furthermore, a universal subroutine possessing polymorphic properties has been designed to manage diverse solvers [14]. Concurrently, a "**thread pool union**" programming paradigm is being developed, which enables the simultaneous, parallel execution of multiple parallelised solvers [15]. This approach aims to achieve significantly higher efficiency in computational resource utilization.

Application Example

This section evaluates a practical numerical scenario focusing on the following core objectives:

- **Energy Power System Simulation**: Models solar energy conversion using photovoltaic panels with a total effective surface area of $S = 2\,m^2$ and a conversion efficiency coefficient of $\eta_{eff} = 25\%$.
- **Scientific Instrument (ScI) Simulation**: Evaluates the electrical power consumption of multiple instrument models operating in either standby or operational mode. Two of these instruments transition into operational mode based on the solution of specific situational tasks.
- **EPS–ScI Interface Simulation**: Simulates the dynamic electrical load and power drain imposed by multiple concurrently operating instruments on the power subsystem.

For the purpose of this demonstration, the satellite's orbital parameters are defined as follows: semi-major axis $a = 7{,}200{,}000\,m$, eccentricity $e = 0.001$, inclination $i = 0.0°$, longitude of the ascending node $\Omega = 0.0°$, and argument of perigee $\omega = 0.0°$. A comprehensive event analysis is executed by solving five distinct situational tasks. Situational task ST_1 determines the specific time intervals when the satellite is in the sunlit segment of its orbit, enabling the solar panels to generate electrical energy. Two other tasks, ST_2 and ST_3 (each compiled by two situational conditions), identify the time windows when the sunlit satellite passes over designated ground segments Θ_1 and Θ_2. These ground targets feature geographic coordinates and angular radii configured as $(33°, 1°, 9°)$ and $(66°, 1°, 9°)$, respectively. Finally, situational tasks ST_4 and ST_5 (each incorporating three situational conditions) define the time intervals when the satellite passes over Θ_1 or Θ_2 while positioned within the Earth's shadow (eclipse zone) and with the Moon located below the local horizon (according to satellite).

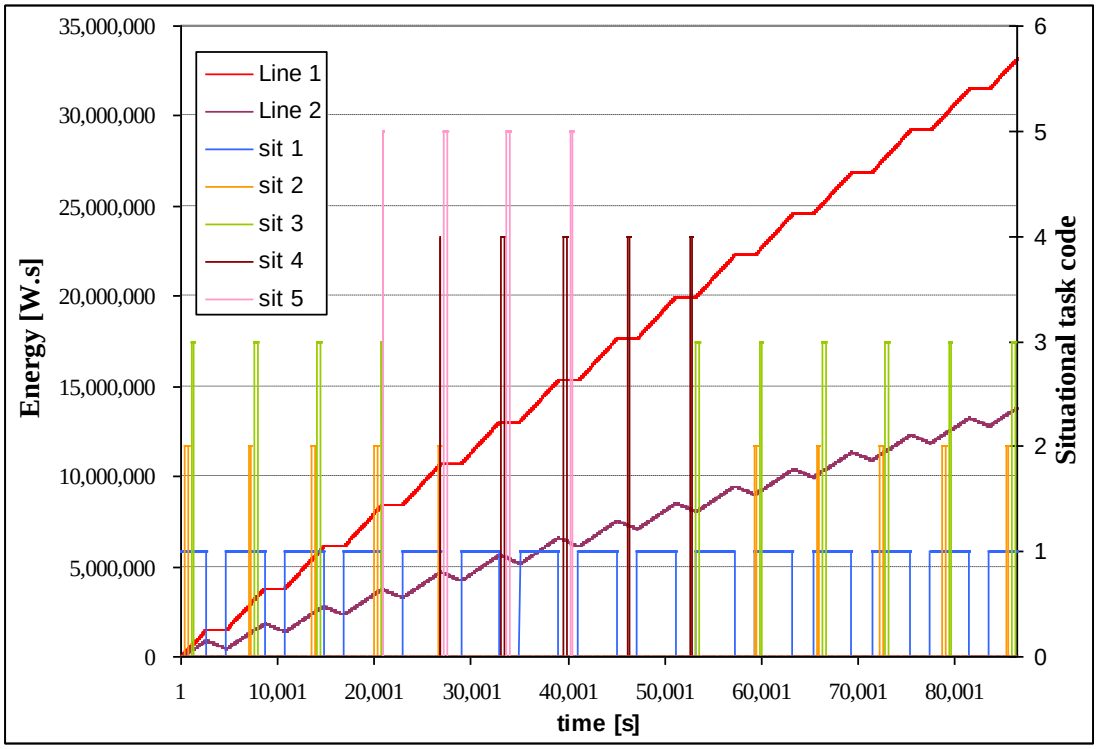


Fig. 3. Line 1 and Line 2 represent the electrical energy generated by the solar panels and its current state as a result of instrument consumption.
Lines sit 1, sit 2, sit 3, sit 4 and sit 5 represent the timing diagrams of the respective situational conditions.

The scenario dynamically models solar energy conversion against the total instrument power demand. In Figure 3, Line 1 presents the converted solar energy received by the panels. Throughout the simulation, a constant (perpendicular) panel orientation relative to the Sun vector is maintained. Efficiency coefficients regarding energy conversion and battery charging are accounted for. Out of six total modelled instruments, four remain permanently in active operational mode with fixed power drains. The fifth asset (an optical instrument operating in the visible spectrum) remains in standby mode and transitions to active operations only when triggered by ST_2 or ST_3. The sixth and final instrument (nominally designated for the infrared spectrum) operates based on the solutions of ST_4 and ST_5. In Figure 3, Line 2 tracks the net residual energy available in the subsystem after incorporating transformation efficiencies and deducting the combined consumption of the active instruments. A secondary vertical axis plots the operational timelines of the five situational tasks, represented schematically using distinct amplitudes corresponding to each task's sequence number.

The primary goal of this demonstration is to validate the communication interfaces established between different models and parallel solvers, alongside utilizing situational task outputs for the deterministic state control of scientific payloads. Further numerical experiments are required to stress-test these frameworks within complex multi-satellite missions, particularly to evaluate the specific characteristics of parallelized models and distributed computational algorithms.

Conclusion and future work

This report presents an initial step in the evolution of the software environment, marking the commencement of modelling specific scientific instruments and developing their interface with the power subsystem. Furthermore, the development of a parallel solver designed to simulate the operations of these instruments has been initiated. To illustrate the capabilities of the developed tools, preliminary results are presented regarding the energy generation from the solar-panel-based satellite power subsystem and the corresponding power consumption by the scientific instruments.

The current models of scientific instruments serve as a foundation for developing an extensive library of models for various spaceborne instruments. Moving forward, it is essential to further develop other satellite subsystems – such as thermal, telecommunication, attitude determination and control, and data storage subsystems – which are currently under investigation. The models for different instrument types will be supplemented by tools for defining instrument command sequences to enable a more detailed simulation of each instrument's functionality and operational states.

References:

1. Esper, J., S. Neeck, J.A. Slavin, W. Wiscombe and F.H. Bauer, Nano/micro satellite constellations for earth and space science. *Acta Astronautica*, *52*(9-12), 2003, pp. 785–791.
2. Millan, R.M., R. von Steiger, M. Ariel, S. Bartalev, M. Borgeaud, S. Campagnola, J.C. Castillo-Rogez, R. Fléron, V. Gass, A. Gregorio and D.M. Klumpar. Small satellites for space science: A COSPAR scientific roadmap. *Advances in space research*, *64*(8), 2019, pp. 1466–1517.
3. Selva D., A. Golkar, O. Korobova, I.L.I. Cruz, P. Collopy, &, O.L. de Weck. Distributed earth satellite systems: What is needed to move forward?. *Journal of Aerospace Information Systems*, *14*(8), 2017, pp. 412–438.
4. Lee, B.S., Y. Hwang, H.Y. Kim and J. Kim, An Integrated Mission Analysis and Planning System for the KOMPSAT-2 Mission Operations. In *SpaceOps 2006 Conference*, 2006, p. 5728.
5. Ambrosio, A.,P. Cardoso and V. Orlando, “Brazilian satellite simulators: previous solutions trade-off and new perspectives for the CBERS program”. In *SpaceOps 2006 Conference*, 2006, p. 5916.
6. Radice, G., R. Wuilbercq and G. Cafiero, “T-smad: a concurrent design tool for space mission analysis and design”. *Frontiers in Aerospace Engineering*, *3*(1), 2014, pp. 1–6.
7. Neto, V.V.G., C.E. Paes, A.J. Rohling, W. Manzano and E.Y. Nakagawa, “Modeling & simulation of software architectures of systems-of-systems”: An industrial report on the brazilian space system. In *2019 Spring Simulation Conference (SpringSim)*, 2019, pp. 1–12.
8. Wertz, J.R., W.J. Larson, Space Mission Analysis and Design. Microcosm Press, Kluwer Academic Publishers, third ed., 1999
9. Chagas, R.A., F.L. de Sousa, A.C Louro and W.G. dos Santos, Modeling and design of a multidisciplinary simulator of the concept of operations for space mission pre-phase A studies. *Concurrent Engineering*, *27*(1), 2019, pp. 28–39.
10. Rabelo, L., L. Low, W. Jung, M. Elkamel, and G. Lee, Enhancing Effectiveness through the Fusion of Machine Learning, VC Simulation, and Agent-Based Modeling. In *IISE Annual Conference. Proceedings* (pp. 1-6). Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), 2024.
11. Atanassov, A.M., Parallel, adaptive, multi-object trajectory integrator for space simulation applications. *Advances in Space Research*, *54*(8), 2014, pp. 1581–1589.
12. Atanassov, A.M., Parallel satellite orbital situational problems solver for space missions design and control. *Advances in Space Research*, *58*(9), 2016, pp.1819 -1826.
13. Rauber, T., G. Rünger, Parallel Programming: For Multicore and Cluster Systems. Springer, 2010.
14. Atanassov, A., UNIFICATION OF “POOL OF THREADS” CONTROL IN THE FRAMES OF DIFFERENT PARALLEL SOLVERS. Proceedings of SES 2016, 2017, pp. 42–46.
15. Atanassov, A., Method of Thread Management in a Multi-Pool of Threads Environments. *Proceedings of SES*, *2014*, 2015, pp. 241–246.

OBSERVATIONAL RESULTS AND INDICATIONS OF ACTIVE STATES IN TWO SU UMA STARS

Daniela Boneva, Krasimira Yankova, Denislav Rusev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: danvasan@space.bas.bg, f7@space.bas.bg, drusev@space.bas.bg

Keywords: *Stars: Binary stars; Stars: cataclysmic variables; Accretion processes*

Abstract: *In this work, we present observational results that give indications of active states over several time-intervals of two SU UMa stars: V368 Per (Perseus) and V521 Peg (Pegasi). We use observational data from the TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) mission and the AAVSO (American Association of Variable Star Observers) international database. Fluctuations in brightness are detected in the light curves of the two objects, obtained from both astronomical facilities. The results show that the stars pass through different types of activity, which we identify as outbursts, superhumps and flickering. Based on a theoretical approach and applying data from observations, we calculate the accretion efficiency for both objects. Then, we compare the behavior of the disc efficiency throughout the targets' rising brightening events and estimate the level of their accretion activity.*

НАБЛЮДАТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ И ИНДИКАЦИИ ЗА АКТИВНИ СЪСТОЯНИЯ В ДВЕ SU UMA ЗВЕЗДИ

Даниела Бонева, Красимира Янкова, Денислав Русев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: danvasan@space.bas.bg, f7@space.bas.bg, drusev@space.bas.bg

Ключови думи: *Звезди: Двойни звезди; Акреция: акреционни дискове*

Резюме: *В настоящата работа представяме резултати от наблюдения за няколко времеви интервала, които показват наличието на активни състояния при две звезди от типа SU UMa: V368 Per (Персей) и V521 Peg (Пегас). Използвани са данни от мисията TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) и международната база данни на AAVSO (American Association of Variable Star Observers). В кривите на блясъка на двата обекта, получени от двата астрономически източника, са открити вариации в яркостта. Резултатите показват, че звездите преминават през различни видове активност, които идентифицираме като избухване, суперхъмп и фликеринг. Въз основа на теоретичен подход и прилагане на данни от наблюдения изчисляваме ефективността на акрецията за двата обекта. Това дава възможност да сравним поведението на ефективността на диска по време на нарастваща яркост на обектите и да оценим нивото на тяхната акреционна активност.*

Introduction

In many astrophysical objects, the states of activity are usually related to some detected observational effects. They should be short- or long-lasting variations in brightness, on time-scales from seconds to days and months. In binary star systems we could recognize fluctuations in their light curves with amplitudes of 0.1–5 (even more) magnitudes, delimited as flickering, flares, superhumps, burst and outbursts.

Flickering is defined as a non-periodic, irregular variation in brightness with amplitudes of a few x 0.1 to 1 magnitudes, seen in the light curves with a duration of seconds to few minutes [2, 20]. Periodic variations in brightness, with periodicity of a few (2–6) percent longer than the orbital period of the studied objects and with low amplitudes in magnitudes, are accepted as a manifestation of superhumps [8, 18]. The sudden fluctuations with a higher magnitudes, > 2 mag, are known as bursts and outbursts [19] that could last from days to months. Flickering could appear during the high states of

the objects, with active outbursts or also in the low quiescent state, whereas superhumps are usually active during the outbursts.

All these events of activity in brightness could be observed in many Cataclysmic variable stars (CVs). Cataclysmic variable stars (CVs) are binary systems that consist of a white dwarf primary star, accreting matter from a main-sequence companion via Roche lobe overflow [19]. As a subclass of CVs, dwarf novae (DNe) manifest outbursts, which last a few days, as well as superoutbursts that prolong for approximately two weeks to several months [12, 15].

One of the subgroups of dwarf novae, SU UMa stars, also exhibits both normal outbursts and superhumps, which typically occur within the duration of long-lasting superoutbursts [4]. We choose to study here two members of the SU Uma stars group that are found to have such brightness activities: V368 Per (Perseus) and V521 Peg (Pegasi).

V368 Per is discovered by Richter (1969) [14], as he reported for the outburst in 1968-10-22 21:36 UTC that prolongs for ≈ 2 days. Later, several outbursts, superoutbursts and superhumps are detected for this object [3]. The average superhump period is found to be Psh ≈ 0.078946 ± 0.000050 days, where the orbital period of the binary is determined as Porb ≈ 0.0762 days [9].

The second object V521 Peg is initially studied only as a dwarf nova star. It is found that the object has outbursts with long recurrent time, detected by (Pojmański, 2001 and Rodríguez-Gil et al. 2005) [13, 16]. A detection of superhumps is reported with periods Psh ≈ 0.061006 ± 0.000029 days, while the orbital period of the binary is estimated as Porb ≈ 0.0599 days [16]. Some of the parameters are calculated in their paper, as mass of the white dwarf M_1 ≈ 0.7 MΘ and the white dwarf radius is $R_1 = 8.7 \times 10^8$ cm ≈ 0.012 RΘ.

In this paper we present observational data for the two SU UMa stars, V368 Per and V521 Peg, obtained both from TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) and AAVSO (American Association of Variable Star Observers), by which to indicate the brightness activity in their light curves (reported in the next Section). The accretion efficiency and an estimation of the dominant accretion modes in the objects are given in the third section, followed by the Discussion.

Observational data and results for V368 Per and V521 Peg

In this section, we apply photometric observational data obtained from two different facilities, TESS and the AAVSO international database. The results from both of them could allow us to analyze more data and for a longer observational time-intervals. We use the time format in UTC: yyyy-mm-dd.

- Observational data and results from TESS

In the TESS field of view, except from transiting exo-planets, observations of over 200 000 objects, including bright stars, are provided too [6]. The light curves constructed by TESS photometric data are analyzed with a 120 s cadence [5].

In this work, we use data from the TESS observations of V368 Per, obtained in the time-interval: 2024-10-27 01:29–2024-11-15 22:50 UTC (2460610.5618 – 2460630.4513 JD (Julian date)) from sector number 85, with an exposure time-length of 200 s.

The data for V521 Peg are obtained in two time-intervals: 2022-09-02 18:12:19–2022-09-30 15:25:02 UTC (2459825.2585–2459853.1423 JD) from the sector number 56, with an exposure time 200 s and 2024-09-05 22:23:41–2024-09-30 21:06:22 UTC (2460559.4331–2460584.3794 JD) from the sector number 83.

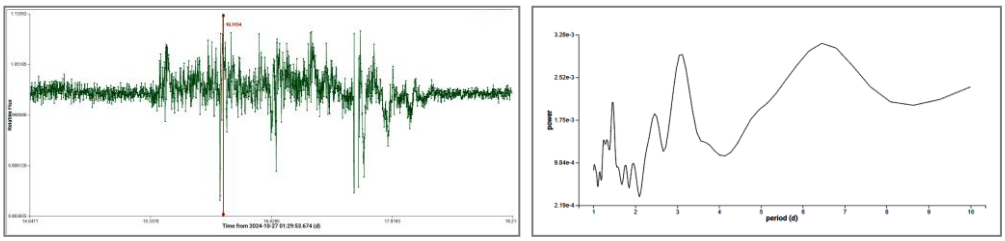


Fig.1. Light curve of V368 Per, created with the data obtained from TESS for the observational interval 2460610.56–2460630.45 JD (a, left panel). The time of the peak in the relative flux is marked with a red vertical line. (b, Right panel): a power-period diagram of V368 Per, obtained by the frequency analysis with data for the same observational time.

The data were downloaded and reduced from the Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST, https://archive.stsci.edu). The light curves for both objects (Fig. 1a and Fig. 2a, c) were constructed as Flux-rate [e-/s] (electrons/second) vs. time in [days]. The Simple Aperture Photometry (SAP) Flux data were used for the light curves analysis.

Irregular variations in the flux-rates are observed in the light curve of V368 Per with amplitudes of increase in values between minimum and maximum in the range: 0.094–1.112 e-/s. The duration is different for each of the events and it is: 0.0077, 0.0118, 0.0187, and 0.0285 days. The maximum value of the relative flux is ~ 1.13 e-/s, marked with a red line in the figure.

Then, we could suggest that these types of variations are close to the flickering nature of activity.

Frequency analysis of the obtained data for the same time-intervals is represented as power-period diagrams (Figs. 1b and 2b, d) with different periods in [days]. To determine the period, the Lomb-Scargle method is applied [11, 17].

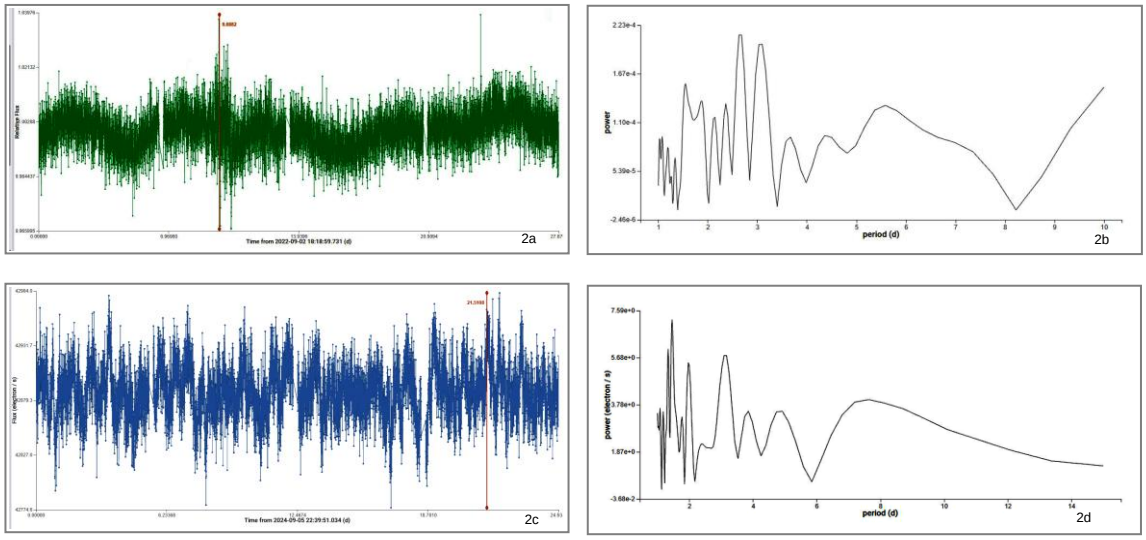


Fig. 2. Light curves of V521 Peg, created with the data obtained from TESS for the observational intervals 2459825.25–2459853.14 JD and 2460559.43–2460584.37 JD (a, c – left panels). The time of the peaks in the flux variation is marked with a red vertical line. (Right panels – b, d): power-period diagrams of V521 Peg, obtained by the frequency analysis data for the same observational times.

In both time-intervals of the V521 Peg light curves, fluctuations in the flux-rate of different types are observed.

The maximum values of these light variations for the first time-interval, in relative flux-rates, are (1.027 ± 0.002) e-/s with an average amplitude between minimum and maximum of (0.043 ± 0.002) e-/s. The highest peak in power detected in the periodogram (Fig. 2b) has periodicity of (2.5 ± 0.2) days, although the duration is ~ 4.5–5 days. Our suggestion for the type of these variations is that they are some-kind of a periodic wave modulation in brightness.

During the second interval, the maximum observed flux-rates vs. time is estimated as (4.29 ± 0.002) $\times 10^4$ e-/s, with an average amplitude between minimum and maximum values of (0.013 ± 0.004) $\times 10^2$ e-/s. The time length-scale of these variations is less than a day and it varies between 15 and 20 hours. The power-period diagram for this interval depicts the power peak at the period of ~ 1.2 ± 0.02 days, which is in correlation with the duration of each of the events.

- Observational data from AAVSO

The obtained observational data for V368 Per in V band cover a six-years observational time-interval in the range: 2455400–2457500 JD (Julian dates) (2010-07-22–2016-07-30 Calendar dates). In the light curve (Fig. 3a) we see irregular variations of brightness with amplitudes of 3–3.5 magnitudes that prolonged 14–20 days. We could determine these sudden increases in brightness as outbursts. The maximum in brightness during the outbursts reaches ~ 15.3 ± 0.046 mag in V band. To better distinguish the brightening events, a detailed view of a shorter time-interval 2456130–2456375 JD, within the whole observational interval, is presented (Fig. 3b). The same activity in brightness could be also seen during a second shorter time-interval 2456500 2456720 JD. The period between these outbursts are estimated to be 35–40 days for both short time-intervals.

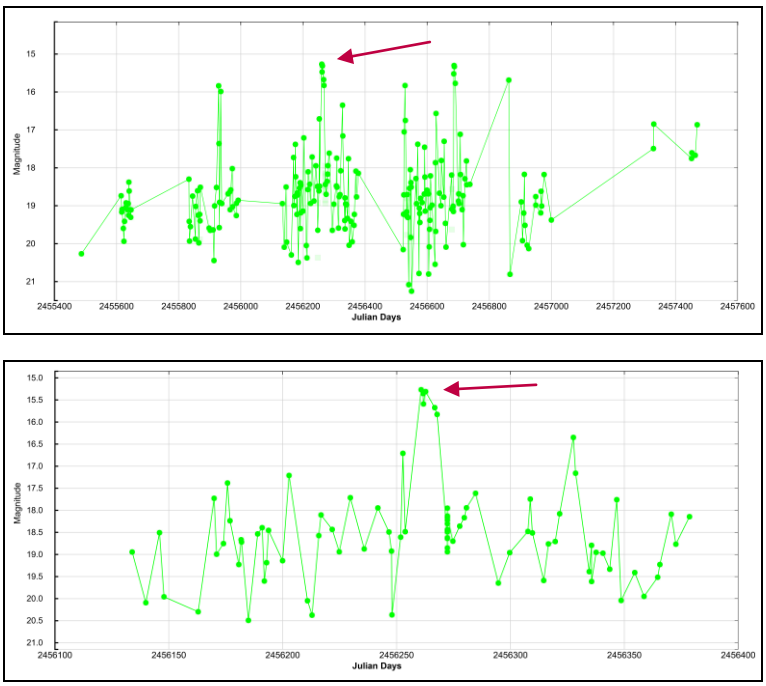
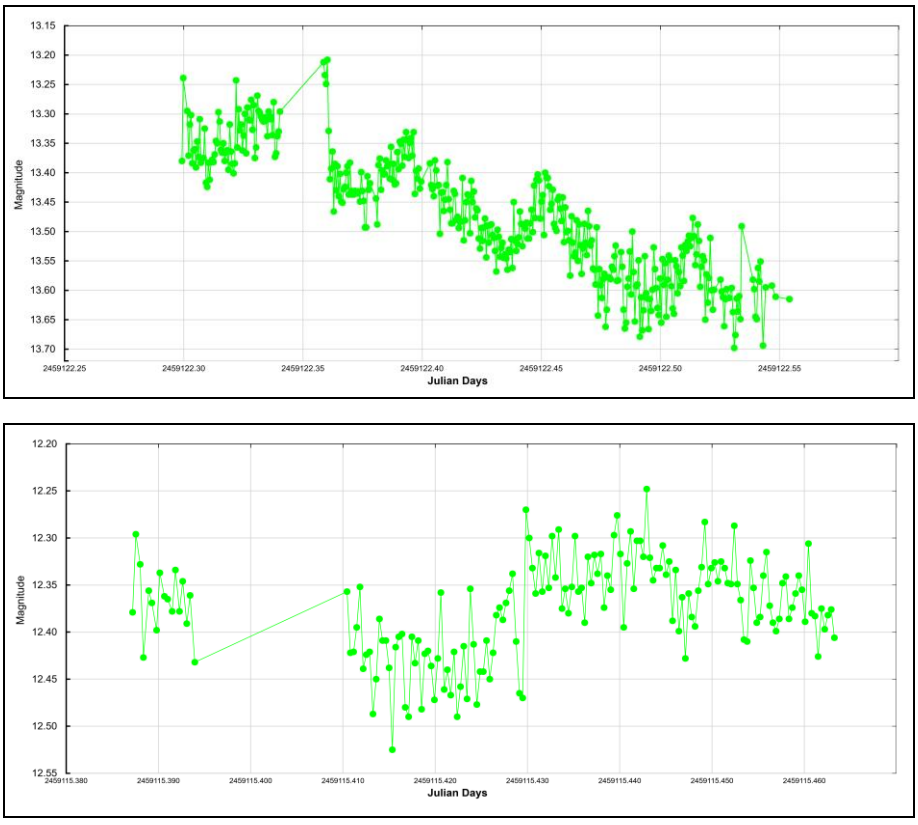


Fig. 3. Light curves of V368 Per in the V band for the intervals of time: 2010-07-22–2016-07-30 (3a, upper panel) and the shorten time-interval within 2012-09-29–2013-03-30 Calendar dates (3b, lower panel). Outbursts are detected with amplitudes 3–3.5 mag (the red arrows mark the maximums). The observational times in the figures are in JD (Julian dates). The data are taken from AAVSO.

For the second object V521 Peg, the eligible observational data that indicate activity of the object were in three short time-intervals. We obtained data for: 2459122.29–2459122.57 JD (2020-09-29 18:30–2020-09-30 01:40 UTC); 2459115.385–2459115.465 JD (2020-09-22 21:10 – 2020-09-22 23:20 UTC); 2458325.38–2458325.62 JD (2018-07-25 20:50–2018-07-26 03:20 UTC). During the first interval, a trend of slightly decrease in brightness is seen, with an average amplitude of 0.35 ± 0.002 mag (Fig.4a). Within this time, variations with min to max amplitudes of 0.162–0.168 mag that prolong for 78–90 min are observed.



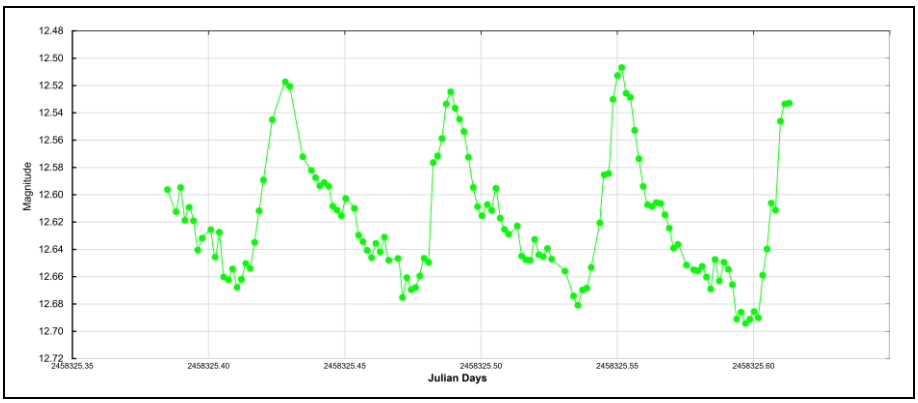


Fig. 4. Light curves of V521 Peg in the V band for the intervals of time: 2020-09-29 – 2020-09-30 (4a, upper panel), 2020-09-22–2020-09-22 (4b, mid panel) and 2018-07-25–2018-07-26 (4c, lower panel) Calendar dates. The observational times in the figures are in JD (Julian dates). The data are taken from AAVSO.

The second time-interval shows very short-period variations in brightness with a duration of 2–3 min and amplitudes of 0.114–0.117 mag. They look more like irregular, non-periodic oscillations. The third interval manifests regular or periodic variations with an average amplitude of increase in brightness of 0.165 ± 0.003 mag. We determined the periodicity of 87–93 min, which is very close or with a few percent higher than the value of the object's orbital period Porb ≈ 0.059 d ≈ 86.25 min. According to the definitions in the Introduction, we can suggest that these variations in brightness are superhumps, which is in agreement with the obtained by Rodríguez-Gil et al. (in [16]) results and a superhump period of Psh ≈ = 89.05 min.

Theoretical approach and accretion activity

In Cataclysmic variable stars, during the mass-transfer process between the two binary components, an accretion disc is formed around the white dwarf object.

It is widely accepted that the instabilities (as thermal) in the disc are responsible for the outbursts in DNe and indirectly tidal, by causing an eccentricity of the disc, for the superhumps production in SU UMa stars [7, 21]. It is evident that the flickering activity is also coming from the processes of instability at outer part of the accretion disc.

In this section, we relate these activities to estimate how efficiently the mass energy of the accreted material is converted into radiation. This gives the parameter of an accretion efficiency.

We calculate average accretion efficiency values for the two objects, by using the formula of Kolb [10]: $\xi = GM_1/R_1c^2$. It is obtained by the expression of accretion luminosity for both: spherical $L_{sph} = \xi \dot{M}_{sph} c^2$ and disc accretion $L_d = \eta \dot{M}_d c^2$. We apply for the luminosity the observational data from the previous section.

M_1 and R_1 are the mass and radius of the central object, in current case of the white dwarf component. Their values are pointed in the Introduction.

The term **ξ** depicts the spherical accretion efficiency. We calculate the disc accretion efficiency **η** by the relation $\eta = \xi(4\,H/R_d)^{-1}$. **Rd** is the disc radius (see the details of the expression in (Boneva and Yankova 2021, [1])).

The calculations give the next results for both types of accretion efficiency (see Table 1):

Table 1. Accretion efficiency values, calculated for V521 Peg and V368 Per.

Object/parameter x 10^{-4}	η_0	η_{a1}	η_{a2}	η_{a3}	%
V521 Peg	3.25	3.5	3.8	4.3	~ 25
V368 Per	4.5			6.2	~ 37

Here, η_0 depicts the disc efficiency in quiescent state, while η_{a1}, η_{a2}, η_{a3} express the efficiency in active states with outbursts and superhumps. It is seen from the table that during the outbursts the disc efficiency increases by ~ 25 % in V521 Peg and by ~ 37 % in V368 Per.

Conclusion

In this paper, we presented observational results of two SU UMa stars V368 Per and V521 Peg, using data from two observational facilities, TESS and AAVSO. In the resulting light curves from both and in the power-period diagrams from TESS, manifestation of different types of activity in brightness was detected. During the objects observational time-intervals, outbursts, flickering and superhumps are identified. From the TESS light curves, we can compare the relative flux rate of both objects and we realize that the amplitude of variations of V368 Per have larger value than that of V521 Peg with a factor of ≈ 2. In the obtained light curves from AAVSO, outbursts activity is detected for V368 Per with amplitude between minimum and maximum of 3–3.5 mag. Manifestations of superhumps and short-interval light oscillations are found in the data and light curves of both time-intervals of the second object V521 Peg, with an average amplitude of brightness variations for the superhumps of ≈ 0.16 mag and the superhump period Psh ≈ 90.2 ± 0.02 min.

Since all these brightening events are related to the disc accretion processes, we estimated the accretion efficiency for both objects. We applied the luminosity from the obtained observational data in the calculations. The results of disc accretion efficiency, show that disc of V368 Per is more active, and its efficiency increases nearly twice as much as that of the V521 Peg.

By comparing the results of both objects, we can suppose that the star V368 Per exhibits more powerful processes in regards to its brightness and the structure of its accretion disc.

Acknowledgments:

This paper includes data collected with the TESS mission, obtained from the MAST data archive at the Space Telescope Science Institute (STScI). Funding for US Institutions for the TESS mission is provided by the NASA Explorer Program. STScI is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under NASA contract NAS 5–26555. The authors acknowledge with thanks the variable star observations from the AAVSO International Database contributed by observers worldwide and used in this research.

The authors acknowledge the research project ”Observational effects and accretion processes in selected binary stars” IC-RS/12/2026-2028 (Bilateral agreement between BAS and SANU, financially supported from the Bulgarian Academy of Sciences).

References:

1. Boneva, D., Yankova, K., Accretion efficiency and mass transfer in two binary star systems, Proceedings of the (CS20.5), 2021, p. 328.
2. Bruch A., Flickering in cataclysmic variables-Its properties and origins, 1992, A&A, 266, 237.
3. Busch, H., K. Häussler, E. Splittgerber, 1979, Veröff. Sternw. Sonneberg, 9, 125.
4. Chomiuk, L., B. Metzger, K. Shen, New Insights into Classical Novae, Annu. Rev. Astron. Astrophys, 2021, 59, 391–444.
5. Gilbert, E.A., T. Barclay, E.V. Quintana et al., Flares, Rotation, and Planets of the AU Mic System from TESS Observations, AJ, 2022, 163, 147.
6. Günther, M.N., Z. Zhan, S. Seager, et al., Stellar Flares from the First TESS Data Release: Exploring a New Sample of M Dwarfs, AJ, 2020, 159, 60.
7. Hirose, M., Y. Osaki, Hydrodynamic simulations of accretion disks in cataclysmic variables: superhump phenomenon in SU UMa stars. 1990, PASJ, 42, 135.
8. Kato, T., D. Nogami, H. Baba, G. Hanson, G. Poyner, CR Boo: The ‘helium ER UMa star’ with a 46.3-d supercycle. MNRAS, 2000, 315, 140–148.
9. Kato, T., F.J. Hambsch, H. Maehara, G. Masi, F. Nocentini, P.A. Dubovsky, I. Kudzej, K. Imamura, M. Ogi, K. Tanabe, H. Akazawa et al., Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. V. The fifth year (2012–2013), PASJ, 2014, 66(2), p. 30.
10. Kolb, U., 2010, Extreme Environment Astrophysics, Cambridge University Press.
11. Lomb, N.R., Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, ApSS, 1976, 39, pp. 447–462.
12. Osaki, Y., Dwarf-nova Outbursts, PASP, 1996, 108 39
13. Pojmański, G. 2001, in ASP Conf. Ser. 246: IAU Colloq. 183: Small Telescope Astronomy on Global Scales, 53.
14. Richter, G. A. 1969, Mitteil. Veränderl. Sterne, 5, 88.
15. Robinson, E. The Structure of Cataclysmic Variables. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1976, 14, 119–142.
16. Rodríguez-Gil, P., B. T. Gänsicke, H. J. Hagen, T. R. Marsh, E. T. Harlaftis, S. Kitsionas, D. Engels, 2005, A&A, 431, 269.
17. Scargle, J.D., Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, ApJ, 1982, 263, 853.
18. Vogt, N, The SU Uma stars – an important sub-group of Dwarf Novae, A&A, 1980, vol. 88, no. 1-2, p. 66–76.
19. Warner, B., 1995a, Cataclysmic Variable Stars. Cambridge University Press.
20. Warner, B., Systematics of superoutbursts in dwarf novae, Ap&SS, 1995b, 226, 187.
21. Whitehurst, R., Numerical simulations of accretion discs–I. Superhumps: a tidal phenomenon of accretion discs. MNRAS, 1988, 232, 35.

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

АНАЛИЗ НА ТРИ МЕТОДА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПЕРИОДА НА ПУЛСИРАЩАТА ПРОМЕНЛИВА ЗВЕЗДА XZ CYGNI

Анатоли Радев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: anatoli.radev2002@mail.space.bas.bg

Ключови думи: *променливи звезди, анализ на периоди, RR Лира, фотометрия, Лафлер–Кинман, Диминг, Ломб–Скаргл*

Резюме: *Представен е анализ на три метода за определяне на периода на пулсиращата променлива звезда XZ Cygni (тип RR Лира, подтип RRab). Използвани са данни от Международната база данни на Американската асоциация на наблюдателите на променливи звезди (AAVSO), обхващащи 63 денонощия в периода JD 2459797.35494 – 2459860.56322, във фотометрична ивица V, съдържащи 9734 наблюдения, извършени от един наблюдател. Приложени са три утвърдени статистически метода – на Лафлер–Кинман, на Диминг и на Ломб–Скаргл. Посредством Фурие-анализ от шести ред са получени амплитудните съотношения и фазовите параметри. Резултатите показват, че изборът на метод има решаващо значение за прецизното физическо моделиране.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THREE METHODS FOR PERIOD DETERMINATION OF PULSATING VARIABLE STAR XZ CYGNI

Anatoli Radev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: anatoli.radev2002@space.bas.bg

Keywords: variable stars, period analysis, RR Lyrae, photometry, Lafler–Kinman, Deeming, Lomb–Scargle

Abstract: *An analysis of three methods for determining the period of the pulsating variable star XZ Cygni (RR Lyrae type, RRab subtype) is presented. Data from the International Database of the American Association of Variable Star Observers (AAVSO) were used, covering 63 days in the interval JD 2459797.35494 – 2459860.56322, in the V photometric band, containing 9,734 observations made by a single observer. Three established statistical methods were applied: Lafler–Kinman, Deeming, and Lomb–Scargle. By means of sixth-order Fourier analysis, amplitude ratios and phase parameters were obtained. The results show that the choice of method is of decisive importance for precise physical modeling.*

Въведение

В настоящата работа са изследвани фотометричните данни на пулсиращата променлива звезда XZ Cygni (тип RR Лира, подтип RRab), получени от Международната база данни на Американската асоциация на наблюдателите на променливи звезди (AAVSO). Данните обхващат 63 денонощия във V фотометрична ивица и съдържат 9734 индивидуални измервания, извършени от един наблюдател, с цел минимизиране на систематичните грешки от различна апаратура и калибровка.

Приложени са три утвърдени метода за периоден анализ. Методът на Лафлер–Кинман [1] е непараметричен и търси периода, при който фазовата крива е най-гладка, без да предполага синусоидална форма на сигнала. При този метод търсеният период съответства на минимума на статистиката. Методът на Диминг [2] е Фурие базиран и изчислява мощността на сигнала за всяка пробна честота, като при него търсеният период съответства на максимума на периодограмата. Методът на Ломб–Скаргл [3, 4] усъвършенства анализа на Фурие чрез

въвеждането на фазово отместване и отчитане на дисперсията на данните, което позволява и статистическа оценка на значимостта на резултатите.

Целта на изследването е да се сравнят трите метода по отношение на точност, стабилност и чувствителност към формата на светлинната крива, както и да се демонстрира необходимостта от прецизно определяне на периода, за да бъдат извлечени точните хармонични параметри на звездата. Резултатите са представени в раздел 4, а тяхното обсъждане – в раздел 5.

Наблюдателни данни

В настоящата работа са използвани фотометрични данни от Международната база данни на Американската асоциация на наблюдателите на променливи звезди (AAVSO) за пулсиращата променлива звезда XZ Cygni [5].

Масивът от данни обхваща 63 календарни дни (от 5 август до 8 октомври 2022 г.) с обща продължителност T = 63.2 денонощия (JD 2459797.35494 – 2459860.56322). Той съдържа 9734 измервания във фотометрична ивица V, извършени от един наблюдател (ATE). Това осигурява висока хомогенност на данните и минимизира систематичните грешки, произтичащи от разлики в апаратурата и калибровката.

Всички измервания са в звездни величини (mag) и са получени при съпоставими условия на наблюдение, което позволява сравнението на резултатите от трите метода.

Методи и програми за периоден анализ

За анализа на неравномерно разпределените във времето фотометрични данни бяха приложени три утвърдени статистически метода: на Лафлер–Кинман, на Диминг и на Ломб–Скаргл. Те са разработени специално за работа с астрономически времеви редове, характеризиращи се с пропуски и неравномерна дискретизация.

Първите два метода са извършени с програмната система WinEFK, разработена от В. П. Горански [6] – специализиран софтуерен пакет за изследване на променливи звезди. При тях бе зададена начална епоха t_0 = 2459810.469 JD , а пробният период бе търсен в интервала от P_{min} = 0.4650 дни до P_{max} = 0.4670 дни. За постигане на максимална точност фазовата стъпка беше последователно сгъстявана от 0.5 до $5x10^{-8}$.

Методът на Ломб–Скаргл не е наличен в WinEFK; за него беше използван собствен софтуер на Python, базиран на библиотеката astropy.timeseries.LombScargle [7]. За разлика от локалното търсене в тесен интервал, тук честотният диапазон е изследван в по-широки граници (P_{min} = 0.2 дни до P_{max} = 0.8 дни). Честотната стъпка е определена съгласно критерия $\Delta f = 1/(10T)$ в случая Δf = 0.001582 $дни^{-1}$, където T дни е общата дължина на времевия интервал. Този избор осигурява достатъчно фина мрежа от пробни честоти, за да не бъдат пропуснати съществени пикове.

Първият метод, който приложих, е методът на Лафлер–Кинман. Той се основава на минимизиране на т.нар. „дължина на струната“ – сумата от квадратите на разликите между съседни точки във фазовата крива. За всеки пробен период *P (или честота f = 1/P)* се изчислява стойността (1):

$$(1) \qquad I_{LK}(f) = \frac{\sum_{k=1}^{N-1}(m_{k+1} - m_k)^2}{\sum_{k=1}^{N}(m_k - \overline{m})^2}$$

където m_k са звездните величини, сортирани по фаза, $\overline{m}$ е тяхната средна стойност. Минимумът на I_{LK} съответства на най-гладката фазова крива, т.е. на истинския период. Предимството на метода е, че не предполага синусоидална форма на сигнала и е устойчив на шум.

Вторият използван метод е методът на Диминг. Той представлява Фурие базиран подход, който адаптира дискретното преобразуване на Фурие за работа с неравномерно разпределени данни във времето. За всеки пробен период *P (или честота f = 1/P)* се изчислява периодограмата (2):

$$(2) \qquad I_D(f) = \frac{1}{N}\left[\left(\sum_{k=1}^{N} m_k \cos 2\pi f t_k\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{N} m_k \sin 2\pi f t_k\right)^2\right]$$

където m_k са звездните величини в моментите t_k. Максимумът на периодограмата съответства на доминиращия период в сигнала.

Третият приложен метод е методът на Ломб–Скаргл. Той усъвършенства Фурие базирания подход чрез въвеждане на фазово отместване τ, гарантиращо инвариантност на резултата спрямо избора на начален момент от време. В основата му стои нормираната периодограма, която отчита центрирането на данните и тяхната дисперсия. За всеки пробен период P (или честота $f = 1/P$) се изчислява статистиката (3):

(3) $$P_{LS}(f) = \frac{1}{2\sigma^2}\left[\frac{\left(\sum_{k=1}^{N}(m_k - \overline{m})\cos 2\pi f(t_k - \tau)\right)^2}{\sum_{k=1}^{N}\cos^2 2\pi f(t_k - \tau)} + \frac{\left(\sum_{k=1}^{N}(m_k - \overline{m})\sin 2\pi f(t_k - \tau)\right)^2}{\sum_{k=1}^{N}\sin^2 2\pi f(t_k - \tau)}\right]$$

където σ е дисперсията на данните, $\overline{m}$ е тяхната средна стойност, а τ е фазовото отместване, гарантиращо инвариантност спрямо избора на началния момент t_0.

За количествено характеризиране на формата на светлинна крива апроксимирах данните с ред на Фурие от шести порядък (4):

(4) $$m(\varphi) = A_0 + \sum_{k=1}^{6}[A_k \cos(2\pi k\varphi) + B_k \sin(2\pi k\varphi)]$$

където φ е фазата, изчислена по определения период, а A_0 е средната звездна величина. От коефициентите A_k и B_k се получават амплитуди R_k (5) и фази φ_k (6):

(5) $$R_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$$

(6) $$\varphi_k = \frac{\pi}{2} - arctan\frac{B_k}{A_k} \ (mod\ 2\pi)$$

Тези комбинации от параметри се използват широко при анализа на RR Лира звездите. Амплитудните отношения и фазовите разлики са въведени за пръв път от Simon & Teays [8] като надеждна мярка за структура на светлинните криви.

В настоящата работа фазовите разлики Φ_{21} и Φ_{31}, приведени към максимум на блясъка, бяха изчислени по формули (7):

(7) $$\Phi_{21} = \varphi_2 - 2\varphi_1\ (mod\ 2\pi), \qquad \Phi_{31} = \varphi_3 - 3\varphi_1\ (mod\ 2\pi)$$

Впоследствие Jurcsik & Kovács [9] демонстрират, че именно тези параметри могат успешно да се използват за определяне на физическите характеристики на звездите от този тип.

Резултати

В този раздел са представени резултатите. Получените периоди и честоти са обобщени в таблица 1.

Таблица 1. Сравнение на основните периоди, получени по методите на Лафлер–Кинман, Диминг и Ломб–Скаргл, и по каталог (AAVSO)

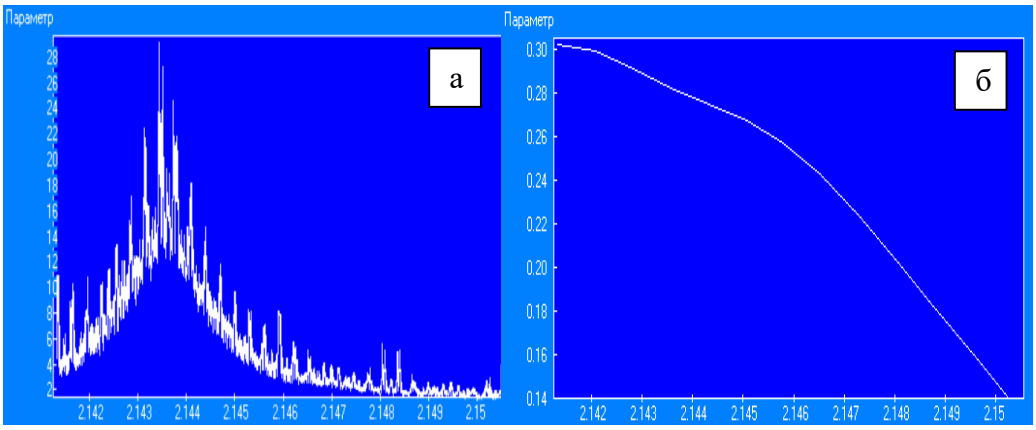
Метод	**Период (дни)**	**Честота (дни$^{-1}$)**	**Отклонение (дни)**
Лафлер–Кинман	0.4665421	2.143429	**–0.000056**
Диминг	0.4669882	2.141382	**+0.000390**
Ломб–Скаргл	0.4665370	2.143500	**–0.000061**
Каталог (AAVSO)	0.4665980	2.142900	–

За да бъде оценена стабилността на методите, достъпни в програмата WinEFK, беше проследено изменението на определения период при последователно сгъстяване на фазовата стъпка. Резултатите са показани в таблица 2.

Таблица 2. Зависимост на определения период и съответната статистика от фазовата стъпка за методите на Лафлер–Кинман (I_{LK}) и Диминг (I_D) реализирани посредством WinEFK.

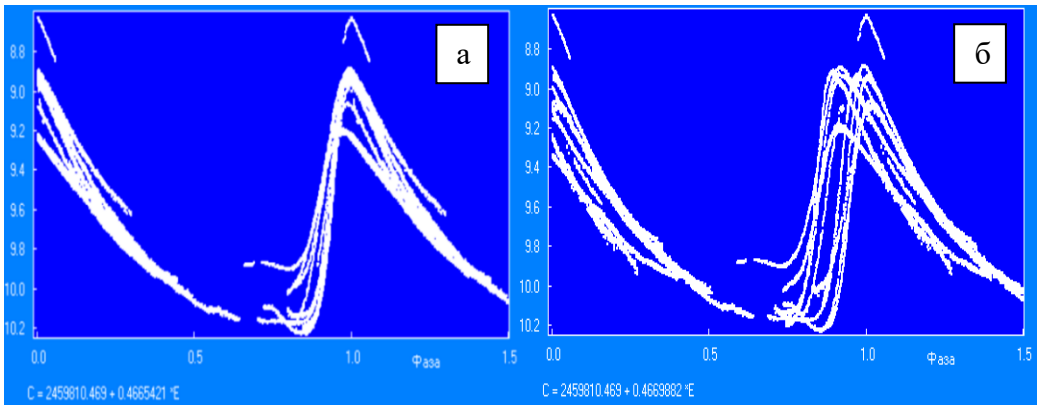
Фазова стъпка	Лафлер–Кинман P (дни)	Статистика I_{LK}	Диминг P (дни)	Статистика I_D
0.5	0.4670000	0.224	0.4653777	0.182
0.05	0.4664830	0.077	0.4650546	0.139
0.005	0.4665347	0.045	0.4667702	0.293
0.0005	0.4665416	0.037	0.4669707	0.302
0.00005	0.4665419	0.034	0.4669897	0.302
0.000005	0.4665420	0.034	0.4669881	0.302
0.0000005	0.4665421	0.034	0.4669882	0.302
0.00000005	0.4665421	0.034	0.4669882	0.302

На фиг. 1 са показани периодограмите, получени по методите на Лафлер–Кинман (ляво) и Диминг (дясно). Периодограмата на Лафлер–Кинман представя суровите стойности на статистиката I_{LK}, поради което се наблюдават локални флуктуации, характерни за този непараметричен метод. При метода на Диминг периодограмата е представена чрез изгладена крива, която подчертава доминиращия пик, без да показва фините вариации. И при двата метода се наблюдава изразен екстремум.



Фиг. 1. Периодограми на XZ Cygni, получени с програмата WinEFK за времевия интервал JD 2459797.35494 – 2459860.56322 по методите на: (а) Лафлер–Кинман – показана е нормираната мощност, чийто максимум съответства на минимума на статистиката (ляво); (б) Диминг – показана е статистиката, чийто максимум съответства на търсения период (дясно)

Фазовите криви представени на фигура 2 показват характерната за RRab звездите асиметрична форма – бързо нарастване на блясъка и по-бавно затихване.



Фиг. 2. Фазови криви на XZ Cygni, получени с периодите, определени по методите на: (а) Лафлер–Кинман (P = 0.4665421 дни) и (б) Диминг (P = 0.4669882 дни). Кривите показват типичната за RRab звездите силно асиметрична форма с рязко нарастване и по-бавно затихване на блясъка

След фазиране с определения период, данните бяха апроксимирани с ред на Фурие от шести порядък, изчислен по съответния метод. Получените амплитудни отношения и фазови стойности са обобщени в таблица 3.

Таблица 3. Хармонични параметри на XZ Cygni, получени по трите метода за времевия интервал JD 2459797.35494 – 2459860.56322

Параметър	Лафлер-Кинман	Диминг	Ломб-Скаргл
P (дни)	0.466542	0.466988	0.466537
A_1 (mag)	0.4309	0.4055	0.4310
A_2 (mag)	0.1729	0.1427	0.1729
A_3 (mag)	0.1345	0.0873	0.1346
R_{21}	0.4012	0.3519	0.4012
R_{31}	0.3122	0.2152	0.3122
Φ_{21}	117.63°	125.80°	117.56°
Φ_{31}	256.43°	258.66°	256.46°

И трите метода потвърждават, че XZ Cygni е типична RRab звезда – с $R_{21} > 0.35$ и силно несинусоидална светлинна крива.

Обсъждане

Сравнението на трите метода показва, че и трите надеждно намират основния период на XZ Cygni, близък до каталожната стойност от AAVSO (0.466598 дни). Най-добро съвпадение показва методът на Лафлер–Кинман (отклонение 5.6×10^{-5} дни), следван плътно от метода на Ломб–Скаргл (6.1×10^{-5} дни). Методът на Диминг дава най-голямо отклонение (3.9×10^{-4} дни), което вероятно се дължи на чувствителността на Фурие базирания подход към хармоничния състав на силно асиметричната крива на RRab звездите.

По отношение на стабилността при сгъстяване на фазовата стъпка методът на Лафлер–Кинман се оказва значително по-устойчив – промяната в определения период при преход от стъпка 5×10^{-4} към 5×10^{-7} е само 0.04 s, докато при метода на Диминг е 1.5 s (35 пъти по-голяма). Това потвърждава предимството на непараметричните методи при анализ на асиметрични светлинни криви.

Физическата интерпретация на резултатите потвърждава, че XZ Cygni е типична RRab звезда – с асиметрична светлинна крива, бързо нарастване и бавно затихване, и амплитудни отношения R_{21} и R_{31}, които са в типичния диапазон за този подтип.

Сравнението на фазовите стойности Φ_{21} и Φ_{31} между трите метода показва, че стойностите за Лафлер–Кинман (Φ_{21} = 117.63°, Φ_{31} = 256.43°) и Ломб–Скаргл (Φ_{21} = 117.56°, Φ_{31} = 256.46°) са практически идентични, докато при Диминг се наблюдава забележимо отклонение (Φ_{21} = 125.80°, Φ_{31} = 258.66°). Това отклонение е съществено и би попречило на прецизното изчисляване на физическите параметри на звездата. Получените резултати потвърждават, че Фурие базираният метод на Диминг е по-чувствителен към хармоничния състав на асиметричната крива и не е препоръчителен избор при работа със звезди от този тип.

Заключение

В заключение можем да отбележим, че сравнителният анализ на трите метода за определяне на периода на XZ Cygni има следните съществени резултати:

- И трите метода дават период, близък до каталожния ($P_{кат}$ = 0.466598 дни), което потвърждава надеждността на използваните данни.
- Най-точно съвпадение с каталога показва методът на Лафлер–Кинман.
- Методът на Лафлер–Кинман е и най-стабилен при сгъстяване на фазовата стъпка.
- Методът на Диминг е най-чувствителен към хармоничния състав на кривата и дава най-голямо отклонение.
- Получените амплитудните отношения R_{21} и R_{31}, както и фазите Φ_{21} и Φ_{31}, потвърждават, че XZ Cygni е типична RRab звезда.
- Получените стойности за Лафлер–Кинман и Ломб–Скаргл са практически идентични, което потвърждава надеждността на резултатите.

Литература:

1. Lafler, J., Kinman, T.D., An RR Lyrae Star Survey with the Lick 20-inch Astrograph. II., ApJS, 1965, 11, 216.
2. Deeming, T.J., Fourier analysis with unequally-spaced data, Ap&SS, 1975, 36, 137.
3. Lomb, N.R., Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, Ap&SS, 1976, 39, 447.
4. Scargle, J.D., Studies in astronomical time series analysis. II., ApJ, 1982, 263, 835.
5. AAVSO International Database – XZ Cygni, https://vsx.aavso.org/index.php?view=detail.top&revid=152583
6. Горански, В. П., Програмна система WinEFK, ГАИШ МГУ, 2008.
7. Astropy Collaboration, Price-Whelan, A.M., et al., The Astropy Project: Sustaining and Growing a Community-oriented Open-source Project, ApJ, 2022, 935, 167.
8. Simon, N.R., Teays, T.J., The Fourier decomposition of RR Lyrae light curves, ApJ, 1982, 261, 588.
9. Jurcsik, J., Kovacs, G., Determination of [Fe/H] from the light curves of RR Lyrae stars, A&A, 1996, 312, 111.

ПРЕХОД НА СЪСТОЯНИЯТА ВЪВ ВРЕМЕТО КАТО TD-СИСТЕМА. ПОДХОД КЪМ ПРОБЛЕМА

Красимира Янкова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: f7@space.bas.bg

Ключови думи: *термодинамика; релативизъм, космология*

Резюме: *Предложихме нов начин за термодинамично описание на времето, който позволява изграждането на концептуалната рамка на нова теория в хода на изследването. В настоящата статия проследяваме разширяването на нашата хипотеза, така че тя да обхване и началното състояние на времето. Ще търсим фундаментални връзки, свързани с прехода към новото/следващо състояние, отчитайки съществуването на компоненти на пространство-време. Ще анализираме поведението на основното многообразие в етапа преди генезиса.*

THE STATES TRANSITION OF THE TIME AS TD-SYSTEM. APPROACH TO THE PROBLEM

Krasimira Yankova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: f7@space.bas.bg

Keywords: *thermodynamics; relativism, cosmology*

Abstract:
We proposed a new way of thermodynamically describing Time that allows in the research process to build the ideology new theory. In this paper, we trace the extension of our hypothesis to the initial state of Time. We will looking for Fundamental connections on the transition the new state whit existence space-time components. We will analyze what the behavior of the main manifold is in the stage before genesis.

Въведение

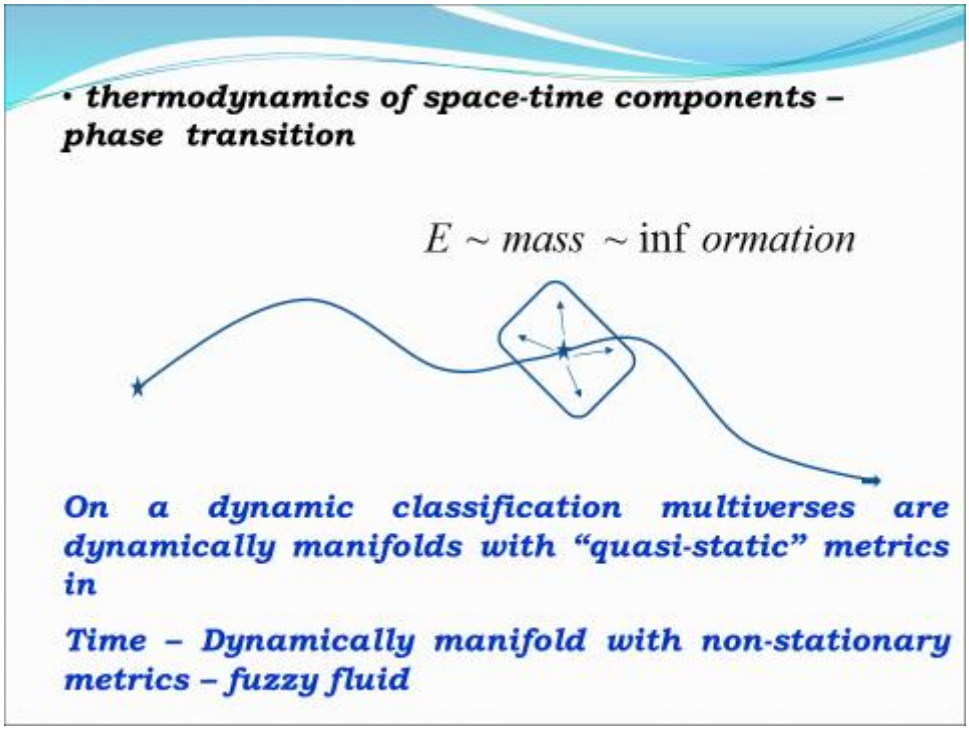
В поредица от статии [3–7] въведохме нова космологична концепция. Тя предлага термодинамична интерпретация на времето като основно ТД-състояние [8], която не налага космическа цезура, но предполага приоритетна посока в развитието на многоизмерната му среда и Вселената/ните в него. Въз основа на нашата разработка търсим начините, по които се развиват процесите на обмен на енергия и протичащите в следствие връзки за трансформацията и в други форми през каскадата от ТД-нива. Разглеждаме възможните механизми за пренос свойствата на средата от една област в друга през процесите на неравновесната термодинамика.

Ентропия

Информационната ентропия S_{inf} е степен на подреждане на информацията в системата – информационни микросъстояния.

Вопсън разширява принципа на Ландауер (Принципът за еквивалентност на маса, енергия и информация), който доказва, че изтриването на един бит информация освобождава минимално количество топлина и постулира, че създаването на информационни битове придава на системата измеримо количество енергия и съответно – изключително малка, но реална маса. [1, 2].

Традиционната физическа ентропия $\mathbf{S_{TD}}$ е ентропия на причинно-следствените връзки и представлява степента на хаотичност във взаимодействията на обектите в локално многообразие (мултиверс). За разлика от втория закон на термодинамиката (който гласи, че физическата ентропия в изоставена система винаги расте), Вопсън формулира хипотезата, че информационната ентропия на системи, съдържащи информация, има тенденция да намалява или да остава постоянна във времето. [1, 2].



Фиг. 1. Схема на спонтанното придвижване на локален мултиверс през измеренията

Времето, разглеждано като отворена система [8], може да се самоструктурира по такъв начин, че ентропията му да намалява.

Ентропията може да расте по два възможни начина:

* Вселените – локалните пространствено-времеви многообразия представляват затворени системи, а тяхната собствена ентропия – разглеждана като сбор от термодинамична (TD) и информационна ентропия – е постоянна величина:

(1) $S_\mu = S_{TD} + S_{inf} = \text{const}$

подреждането на информацията в каскадни структури води до намаляване на информационната ентропия Sinf ↓, тъй като създава ред; това обаче не противоречи на закона за запазване на енергията, понеже самото подреждане изисква енергия, което води до увеличаване на термодинамичната ентропия STD ↑ .

* Нарастване на ентропията в рамките на каскадите:

(2) $S_\mu = S_{TD} + S_{inf}$

(3) $S_{inf}\uparrow, S_{BH}\uparrow, S_{TD}\uparrow \Rightarrow S_\mu\uparrow$

енергията се прехвърля към дъщерно многообразие.

В основното многообразие обаче се осъществява регулация чрез изчезването на краткоживущи локални мултивселени, чието загиване възстановява част от изгубените симетрии в основното многообразие. Също така е възможно областите с хаотично време да служат като буферен механизъм за регулиране на ентропията в зоните с подредено време.

Това е двустранен механизъм Времето да поддържа скрит ресурс спонтанно да се отдалечава от равновесието си и да увеличава степените си на подреденост и сложност.

Относителност и неопределеност

В основно състояние Времето е недетерминирана среда без памет за начални условия и затова всичките симетрии на многообразието са равностойни и еднакво вероятни. Няма причинно-следствени връзки. Няма фини настройки, така че неопределеността в собствената динамика създава условия многообразието да прояви самоорганизираща критичност и да премине в ново състояние.

Новосформираните компоненти на пространство-време вече могат да се движат свободно между времевите измерения (Фиг. 1). Причинно-следствените връзки вече са активирани. Безвъзвратната загуба на информация противоречи на физическите закони, затова информацията преминаваща през каскадите е деградирала, изкривена и деформирана, но по точно определен начин – модулация от чиято сигнатура може да се извлече допълнително през конкретика от предишни състояния. Тя има потенциал да съхрани паметта си за НУ макар и във непълна форма.

Заключение

Тази статия е част от нашето теоретично изследване върху фундаменталната еволюция на Времето. В бъдещите си изследвания ще търсим отговори на следните въпроси:

1. Ще търсим подходи за проследяване на еволюцията на ентропията по протежение на естакадите от слоести структури на локални мултивселени и техните самоорганизиращи се разклонения; и в двете посоки – прави и обратни каскади.
2. Да определим и изясним природата на причинно-следствените връзки, осигуряващи нетермичен контрол върху механизмите.

Литература:

1. Vopson M. M., 2019, *AIP Advances* 9, 095206, https://doi.org/10.1063/1.5123794
2. Vopson M. M., 2023, *AIP Advances* 13, 105308, https://doi.org/10.1063/5.0173278
3. Yankova, Kr., 2020, Proceedings SES 2020, ISSN 1313-3888, 81–83.
4. Yankova, Kr., 2022, Proceedings SES 2022, ISSN 1313-3888, 47–50.
5. Yankova, Kr., 2023, Proceedings SES 2023, ISSN 1313-3888, 91–93.
6. Yankova, Kr., 2024, Proceedings SES 2024, ISSN 1313-3888, 76–78.
7. Yankova, Kr., 2025, Proceedings SES 2025, ISSN 1313-3888, 49–51.
8. Yankova, Kr., 2026, Aerospace Research in Bulgaria. 38, Sofia. DOI: https://doi.org/10.3897/arb.v38.e03

SEASONAL MODULATION AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF MIDLATITUDE POSITIVE BAYS OBSERVED AT THE PANAGYURISHTE GEOMAGNETIC OBSERVATORY DURING SOLAR CYCLE 23/24 AND 24/25 TRANSITIONS

Lyubomira Raykova, Veneta Guineva, Rolf Werner

Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora, Bulgaria
E-mail: heiti456@gmail.com

Keywords: *midlatitude positive bays; substorm current wedge; solar minima; solar wind; SYM-H*

Abstract: *Midlatitude positive bays (MPBs) serve as ground-based indicators of the Substorm Current Wedge (SCW) during magnetospheric substorms. This study analyzes the seasonal modulation and temporal distribution of MPB events recorded at the Panagyurishte observatory during 13-month intervals centered around the December solar minima in 2008 (Cycle 23/24) and 2019 (Cycle 24/25). MPB events were identified between 18:00 and 24:00 UT using 1-minute X-component magnetic data. Monthly occurrence peaks in March and September–October, consistent with the Russell–McPherron effect. Within the selected time window, beginning times are most frequent between 20:00 and 22:00 UT. Analysis using the Solar Wind Large-Scale Phenomena Catalog (http://www.iki.rssi.ru/omni/) and the SYM-H index from the OMNI database (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/) indicates that slow solar wind is the largest classified category in both intervals (>53%), while no-storm and recovery-phase cases together account for most MPBs.*

СЕЗОННА МОДУЛАЦИЯ И ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА MPB, НАБЛЮДАВАНИ В ГЕОМАГНИТНАТА СТАНЦИЯ ПАНАГЮРИЩЕ ПРИ ПРЕХОДИТЕ МЕЖДУ СЛЪНЧЕВИТЕ ЦИКЛИ 23/24 И 24/25

Любомира Райкова, Венета Гинева, Ролф Вернер

Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките, Стара Загора, България
E-mail: heiti456@gmail.com

Ключови думи: *MPB; токов клин на суббурята; слънчев минимум; слънчев вятър; SYM-H*

Резюме: *MPB служат като наземни индикатори за токовия клин на суббурята (SCW). Изследвани са сезонното и времевото разпределение на MPB, регистрирани в геомагнитната обсерватория Панагюрище през два 13-месечни интервала около слънчевите минимуми през декември 2008 г. (цикли 23/24) и декември 2019 г. (цикли 24/25). Събитията са идентифицирани между 18:00 и 24:00 UT по едноминутни данни за X-компонентата на магнитното поле. Месечното разпределение има максимуми през март и септември–октомври, в съгласие с ефекта на Ръсел–Макферон. В разглеждания часови интервал началните моменти са най-често между 20:00 и 22:00 UT. Анализът с Каталога на структурите в слънчевия вятър и индекса SYM-H от OMNI показва, че бавният слънчев вятър е най-голямата класифицирана категория и през двата периода (над 53%), а случаите извън буря и във фазата на възстановяване, взети заедно, обхващат повечето MPB.*

Introduction

Geomagnetic storms result from enhanced coupling between the solar wind and Earth's magnetosphere. Coronal mass ejections (CMEs), associated with solar magnetic activity, are an important source of such disturbances. They often originate in active regions with complex magnetic field structures, and some are associated with erupting solar prominences [Temmer, 2026; Sammis et al., 2000; Gopalswamy et al., 2003].

Magnetospheric substorms produce transient disturbances that can be recorded by ground-based magnetometers. As a substorm develops, part of the current in the magnetotail is diverted along magnetic field lines into the ionosphere. This forms the Substorm Current Wedge (SCW), a current system associated with the auroral electrojets [McPherron, 1972; McPherron et al., 1973a]. The SCW has been studied since the 1970s [McPherron et al., 1973b; Kisabeth and Rostoker, 1974].

During the substorm expansion phase, the SCW produces different geomagnetic signatures depending on the station's latitude: a sharp negative deflection in the X-component at auroral latitudes and a positive deflection at midlatitudes. The latter is known as a midlatitude positive bay (MPB) and is recorded in the horizontal component of the magnetic field [McPherron, 1972; Kepko et al., 2014; Guineva et al., 2021; Guineva et al., 2024a,b; Guineva et al., 2025]. MPBs are therefore useful indicators of substorm onset and, in some cases, may provide a more reliable indication of it than the global SML index [McPherron and Chu, 2017].

In this work we carry out a comparative analysis of the seasonal and monthly distribution of the MPB occurrence during SC23 and SC24 minima at the midlatitude station Panagyurishte in the time interval 18:00–24:00 UT, depending on the solar-wind structures and geomagnetic storm/non-storm conditions.

Data and Event Selection Criteria

This study uses 1-minute X-component magnetic field data from the Panagyurishte (PAG) station (37° N geomagnetic latitude, 97° E geomagnetic longitude), which is well situated for observing midlatitude positive bays (MPBs). Events were identified between 18:00 and 24:00 UT using the Station Catalog's "Monthly lists" and "Magnetic field data," following Guineva et al. (2023). Selection required a distinct X-component maximum at PAG coincident with, or close in time to, a minimum in the auroral IL index. Only events with an MPB amplitude exceeding 5 nT and IL below −200 nT were retained. The associated high-latitude negative bay was also required to last at least 10 minutes at a 2σ deviation threshold. The analysis considers both MPB amplitude and the peak X-component value (Xmax). For the study, the MPB amplitudes and Xmax were divided into groups by their values as follows: 5-10 nT, 10-20 nT and greater than 20 nT.

For each MPB, the SYM-H time series was examined to determine whether a geomagnetic storm was present and, if so, whether the event occurred during its initial, main, or recovery phase. Solar-wind conditions were classified using the Solar Wind Large-Scale Phenomena Catalog as slow (SWslow) or fast (SWfast) solar wind, heliospheric current sheet (HCS), corotating interaction region (CIR), Ejecta (EJE), magnetic cloud (MC), or sheath region (SHE). Together, these classifications describe the geomagnetic and solar-wind conditions associated with the observed MPBs.

Results

The comparison covers monthly occurrence, the distribution by the MPB amplitude, the peak X-component deviation (Xmax), and the MPB beginning time, followed by geomagnetic and solar-wind classifications. Amplitude is the rise from the X value at the beginning of a bay to its peak; it can therefore exceed Xmax if the beginning value is negative.

MPB occurrence increases near both equinoxes (Fig. 1). The autumn maximum falls in September in 2008–2009 and October in 2019–2020; both distributions also show a March maximum. This pattern is consistent with semiannual modulation associated with the Russell–McPherron effect.

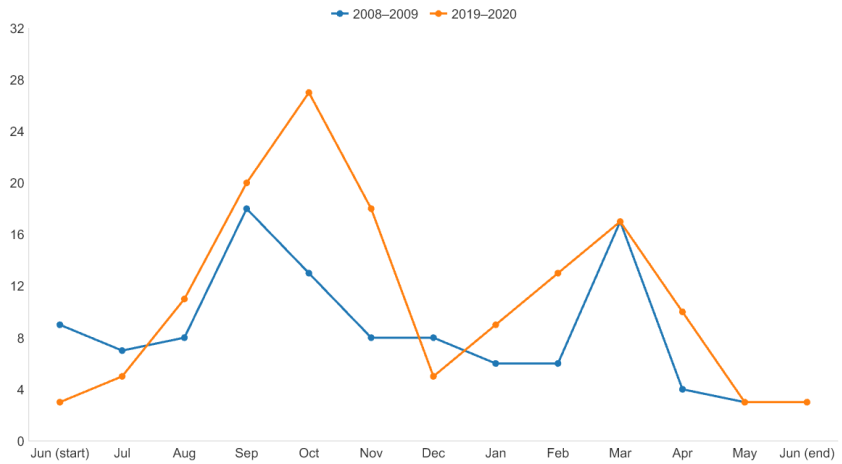


Fig. 1. Monthly distribution of MPB events in 2008–2009 and 2019–2020

The 10–20 nT amplitude bin contains the most events in both intervals (Fig. 2) with maxima in September/October and March. In 2008–2009, it includes 12 events in September and 12 in March; in 2019–2020, it includes 12 in October and 11 in March. Events above 20 nT are less frequent.



Fig. 2. Comparison of MPB amplitude distributions for the periods 2008–2009 and 2019–2020

The 5–10 nT Xmax range is the largest category in both periods (Fig. 3). It also shows maxima in March and September/October. It reaches 13 events in March 2009 and 18 in October 2019; the 2019–2020 interval also has 15 events in November 2019.

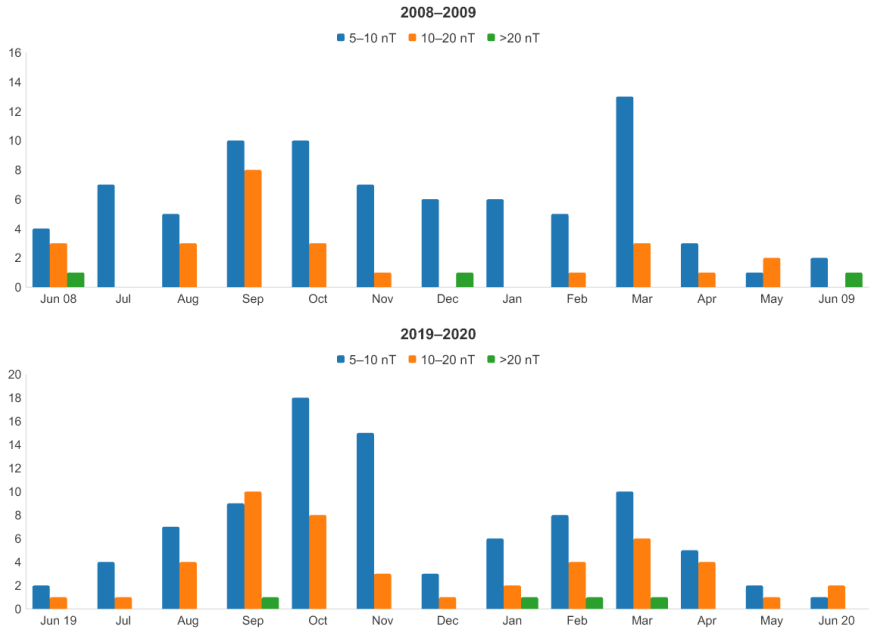


Fig. 3. Monthly distribution of peak X-component deviation (Xmax) in 2008–2009 and 2019–2020

Within the selected 18:00–24:00 UT window, 20:00–22:00 UT is the most frequent two-hours beginning-time bin (Fig. 4) for both time periods. In 2008–2009, it contains 10 March and 9 September events. The 2019–2020 pattern is less uniform: 18:00–20:00 UT starts increase in September–October, while the 22:00–24:00 UT bin is prominent in November.



Fig. 4. Distribution of MPB beginning times (UT) in 2008–2009 and 2019–2020

No-storm cases account for 69% of MPBs in 2008–2009 and 42% in 2019–2020 (Fig. 5). In the second interval, no storm remains the largest single category, although storm-associated cases collectively are more frequent. Recovery-phase cases account for 18% and 36%, respectively, compared with 8% and 17% during the main phase. The initial phase represents 5% in each interval.

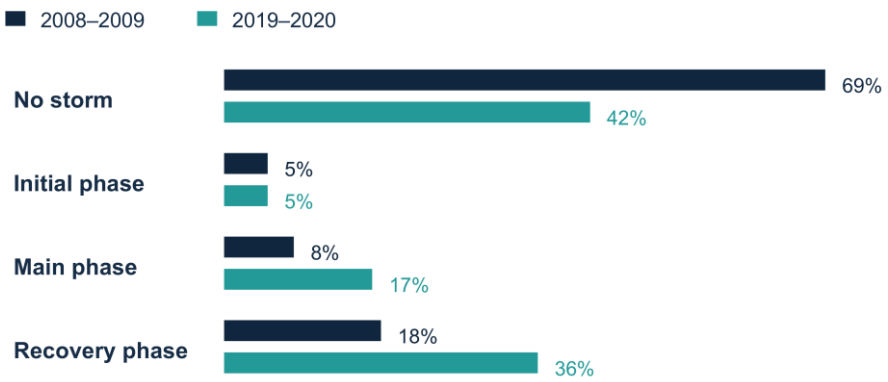


Fig. 5. MPB occurrence by geomagnetic-storm phase in 2008–2009 and 2019–2020.

Slow solar wind is the largest classified structure in both intervals (Fig. 6): 64.8% in 2008–2009 and 53.1% in 2019–2020. Fast solar wind accounts for 21.3% and 23.8%, respectively. CIR contributes 9.3% in the first interval, whereas HCS contributes 12.9% in the second. These shares describe the conditions associated with detected MPBs.

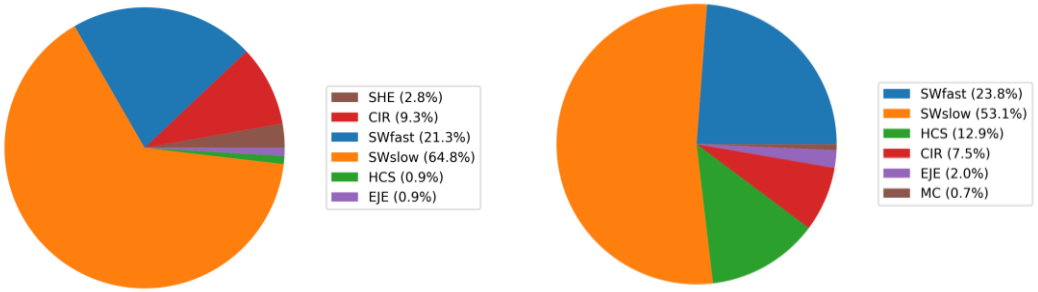


Fig. 6. Distribution of solar-wind structures during MPB events (left: 2008–2009; right: 2019–2020)

Conclusion

The MPB occurrence during SC23 and SC24 minima at the midlatitude station Panagyurishte has been studied in the time interval 18:00 -24:00 UT, corresponding to the midnight MLT interval. In both studied intervals of solar minima the MPB occurrence and behavior are similar.

MPB occurrence peaks in March and again around September–October in both studied 13 months intervals confirming the Russel-McPherron effect. Amplitudes of 10–20 nT and Xmax values of 5–10 nT dominate in the amplitude and Xmax distributions, respectively. In both studied periods the Russel-McPherron effect is also well expressed in these distributions.

The most frequent beginning-time interval is 20:00–22:00 UT and the Russel-McPherron effect for this time period is observed as well.

The classification by solar-wind structures shows slow wind as the largest category (64.8% in 2008–2009; 53.1% in 2019–2020).

In the storm-phase tables, no-storm cases 69% (2008–2009) and 42% (2019–2020) and recovery-phase cases 18% (2008–2009) and 36% (2019–2020) are the largest parts.

Acknowledgements

We acknowledge the SuperMAG collaboration (Gjerloev et al. 2012). The authors are grateful to the creators of the databases SuperMAG (https://supermag.jhuapl.edu/), IMAGE (http://space.fmi.fi/image), OMNI (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/), INTERMAGNET (http://intermagnet.org/) and the Solar Wind Large-Scale Phenomena Catalog (http://www.iki.rssi.ru/omni/) for the opportunity to use them in this work.

References:

1. Temmer, M. CME Observations from Sun to Impact on Geospace. In: N. Gopalswamy, D. Banyś, S. Gadimova (eds.), Proceedings of the United Nations/Germany Workshop on the International Space Weather Initiative, Springer Proceedings in Physics, Vol. 431, 2026, pp. 3–13. DOI: 10.1007/978-981-95-1121-1_1.
2. Sammis, I., F. Tang, H. Zirin. The Dependence of Large Flare Occurrence on the Magnetic Structure of Sunspots. Astrophysical Journal, Vol. 540, No. 1, 2000, pp. 583–587. DOI: 10.1086/309303.
3. Gopalswamy, N., M. Shimojo, W. Lu, S. Yashiro, K. Shibasaki, R. A. Howard. Prominence Eruptions and Coronal Mass Ejection: A Statistical Study Using Microwave Observations. Astrophysical Journal, Vol. 586, 2003, pp. 562–578. DOI: 10.1086/367614.
4. McPherron, R. L. Substorm related changes in the geomagnetic tail: The growth phase. Planetary and Space Science, Vol. 20, No. 9, 1972, pp. 1521–1539. DOI: 10.1016/0032-0633(72)90054-2.
5. McPherron, R. L., C. T. Russell, M. Aubry. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms. Journal of Geophysical Research, Vol. 78, No. 16, 1973a, pp. 3131–3149. DOI: 10.1029/JA078i016p03131.
6. McPherron, R. L., C. T. Russell, M. G. Kivelson, P. J. Coleman Jr. Substorms in space: The correlation between ground and satellite observations of the magnetic field. Radio Science, Vol. 8, No. 11, 1973b, pp. 1059–1076. DOI: 10.1029/RS008i011p01059.
7. Kisabeth, J. L., G. Rostoker. The expansive phase of magnetospheric substorms: 1. Development of the auroral electrojets and auroral arcs configuration during substorm. Journal of Geophysical Research, Vol. 79, No. 7, 1974, pp. 972–984. DOI: 10.1029/JA079i007p00972.
8. Kepko, L., R. L. McPherron, O. Amm, S. Apatenkov, W. Baumjohann, J. Birn et al. Substorm current wedge revisited. Space Science Reviews, Vol. 190, 2014, pp. 1–46. DOI: 10.1007/s11214-014-0124-9.
9. Guineva, V., R. Werner, I. Despirak, R. Bojilova, L. Raykova. Mid-latitude positive bays during substorms by quiet and disturbed conditions. Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, Vol. 74, No. 8, 2021, pp. 1192–1200. DOI: 10.7546/CRABS.2021.08.11.
10. Guineva, V. H., R. Werner, A. M. Atanassov, R. Ts. Bojilova, L. N. Raykova, D. T. Valev. Determination of the Parameters of Midlatitude Positive Bays Caused by Magnetospheric Substorms. Proceedings of the Fifteenth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", 2023, pp. 56–63. DOI: 10.31401/WS.2023.proc.
11. Guineva, V., R. Werner, R. Bojilova, L. Raykova, A. Atanassov, D. Valev. Analysis of Substorms Related to Strong MPB at Panagjurishte Station in 2022. Proceedings of the Sixteenth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", 2024a, pp. 56–63. DOI: 10.31401/WS.2024.proc.08.
12. Guineva, V., R. Werner, R. Bojilova, L. Raykova, A. Atanassov, D. Valev. Study of the Midlatitude Positive Bays at the Magnetic Station Panagyurishte during the Descending Phase of Solar Cycle 24. Proceedings of the Twentieth Anniversary International Scientific Conference "Space, Ecology, Safety" (SES 2024), 2024b, pp. 48–54.
13. Guineva, V. H., I. V. Despirak, R. Werner, A. A. Lubchich, L. Raykova, R. Bojilova. The Geomagnetic Midlatitude Effects of the Supersubstorms during May 10–12, 2024 Superstorm. Proceedings of the Seventeenth Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere", 2025, pp. 92–109. DOI: 10.31401/WS.2025.proc.14.
14. McPherron, R. L., X. Chu. The midlatitude positive bay and the MPB index of substorm activity. Space Science Reviews, Vol. 206, 2017, pp. 91–122. DOI: 10.1007/s11214-016-0316-6.

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА НА СЛЪНЧЕВАТА КОРОНА В БЯЛА СВЕТЛИНА ПО ВРЕМЕ НА НАМАЛЯВАЩАТА ФАЗА НА 11-ГОДИШНИЯ СЛЪНЧЕВ ЦИКЪЛ

Десислава Тенева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: dessi_bg@yahoo.com

Ключови думи: *Слънчева корона, пълно слънчево затъмнение, слънчев минимум, слънчева активност*

Резюме: *Структурата и формата на слънчевата корона са променливи и зависят от нивото на слънчевата активност в рамките на 11-годишния слънчев цикъл. Фазата на намаляване на слънчевата активност е по-продължителна (6–7 години) и протича постепенно, за разлика от фазата на нарастване, при която активността се увеличава бързо и която е по-кратка (4–5 години). Анализът на тези фази е важен за изследването на произхода и еволюцията на слънчевите магнитни полета и на слънчевата активност. За низходящата фаза на слънчевия цикъл е характерно разширяването на полярните коронални дупки към по-ниски хелиографски ширини, което води до образуването на потоци от високоскоростен слънчев вятър.*

Изследваме формата и структурата на слънчевата корона в бяла светлина въз основа на снимки, получени при наземни наблюдения по време на пълните слънчеви затъмнения през 2006 и 2008 г., настъпили в низходящата фаза на 23-ия слънчев цикъл, както и през 2017 и 2019 г., настъпили в низходящата фаза на 24-ия слънчев цикъл. Изображенията на короната в бяла светлина са получени с помощта на обективи с параметри 250/2000 mm и 300 mm, както и на телескоп тип „Максутов–Касегрен“ с фокусно разстояние 2000 mm, оборудвани с цифрови камери с висока разделителна способност. Снимките са направени при различни времена на експозиция – от 1/2000 s до 5 s. Получените по време на затъмненията изображения на короната са сравнени с близки по време изображения във видимата област на спектъра, получени с коронографа LASCO на борда на космическата обсерватория SOHO.

Изчислените индекси на сплеснатост на Людендорф (Ludendorff) и фазата на слънчевия цикъл показват, че короната в бяла светлина е от междинен тип, характерен за периода преди слънчевия минимум.

STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE WHITE-LIGHT SOLAR CORONA DURING THE DECLINING PHASE OF THE 11-YEAR SOLAR CYCLE

Dessislava Teneva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: dessi_bg@yahoo.com

Keywords: *Solar corona, total solar eclipse, solar minimum, solar activity*

Abstract: *The structure and shape of the solar corona are variable and depend on the level of solar activity during the 11-year solar cycle. The declining phase of solar activity is longer (6–7 years) and progresses gradually, in contrast to the shorter rising phase (4–5 years), during which activity increases rapidly. The analysis of these phases is important for investigating the origin and evolution of solar magnetic fields and solar activity. The declining phase of the solar cycle is characterized by the expansion of polar coronal holes toward lower heliographic latitudes, leading to the formation of high-speed solar wind streams.*

We investigate the shape and structure of the white-light solar corona based on images obtained from ground-based observations during the total solar eclipses of 2006 and 2008, which occurred during the declining phase of Solar Cycle 23, and those of 2017 and 2019, which occurred during the declining phase of Solar Cycle 24. The white-light coronal images were obtained using lenses with specifications of 250/2000 mm and 300 mm, as well as a Maksutov–Cassegrain telescope with a focal length of 2000 mm, equipped with high-resolution digital cameras. The images were captured at various exposure times, ranging from 1/2000 s to 5 s. The coronal images obtained during the eclipses were compared with near-contemporaneous images in the visible spectral range acquired by the LASCO coronagraph aboard the SOHO space observatory.

The calculated Ludendorff flattening indices and the phase of the solar cycle indicate that the white-light corona exhibits an intermediate type, characteristic of the period preceding solar minimum.

Въведение

Космическите обсерватории предоставят изключителни възможности за изследване на физичните процеси в слънчевата корона. Наземните наблюдения по време на пълни слънчеви затъмнения дават възможност за изследване на най-вътрешните области на короната (Pasachoff, 2009). Това осигурява безценна информация за глобалното и локалното магнитно поле на Слънцето, както и за нагряването, структурата и динамиката на короната.

Пълно слънчево затъмнение настъпва някъде на Земята приблизително на всеки 18 месеца. При това явление Луната закрива напълно слънчевия диск. В този момент става видима структурата на короната – външната атмосфера на Слънцето, която при обичайни условия остава скрита поради значително по-яркото излъчване на фотосферата. Короната представлява обширна област от силно нагрята плазма, чието поведение се определя в значителна степен от магнитното поле на Слънцето. Когато фотосферата бъде закрита, короната се разкрива в пълния си блясък – като бледо перленосветло сияние, от което се простират коронални стримери, излизащи от слънчевата повърхност.

Оптичните наблюдения на короната в бяла светлина продължават да бъдат основен източник на информация за различните области на средната и външната слънчева корона. Короната в бяла светлина се състои от K-корона (от нем. Kontinuierlich – непрекъсната) и F-корона (от Fraunhofer – Фраунхоферова). K-короната се формира в резултат на разсейването на фотосферното излъчване от бързо движещите се коронални електрони, докато F-короната възниква при разсейването на фотосферната светлина от праховите частици в междупланетното пространство между орбитите на Меркурий и Земята (Stoeva et al., 2011).

Изследването на короната в бяла светлина е насочено преди всичко към изучаването на нейния най-ярък компонент – пояса на короналните стримери. Формата и структурата на слънчевата корона зависят от 11-годишния цикъл на слънчевата активност, поради което техният анализ е важен за изследването на произхода и еволюцията на слънчевите магнитни полета и слънчевата активност.

Короналните изхвърляния на маса (Coronal Mass Ejections, CMEs), слънчевите протуберанси и слънчевите изригвания са основните еруптивни явления, задвижвани от усуканите магнитни полета на Слънцето. Тези явления са тясно взаимосвързани и достигат максимална честота през най-активните фази на слънчевия цикъл (Simnett, 2000).

В данните от коронографа LASCO се открояват две области с повишена концентрация на коронални изхвърляния на маса: короналните пояси, разположени между области с противоположна магнитна полярност, на около 30° от неутралната линия на повърхността на източника (source surface), в близост до хелиосферния екватор, и веригите от коронални стримери, които разделят коронални дупки или области с отворени магнитни силови линии с еднаква полярност и се наблюдават на хелиографски ширини над 30°.

В близост до Слънцето короналните изхвърляния на маса от ниски хелиографски ширини се отклоняват предимно към екватора, докато тези от високи ширини се отклоняват към полюсите. Поради това при минимум на слънчевата активност и във възходящата фаза на слънчевия цикъл, когато преобладават короналните изхвърляния на маса от ниски ширини, първоначалното им отклонение по време на разпространението е предимно в екваториална посока. Траекторията на короналното изхвърляне на маса в близост до мястото на възникването му се определя от едромащабното магнитно поле на Слънцето (Fainshtein and Ivanov, 2010).

Низходящата фаза на слънчевия цикъл е по-продължителна – около 6–7 години, като през нея слънчевата активност постепенно намалява. За разлика от нея, възходящата фаза е по-кратка – приблизително 4–5 години, и се характеризира с бързо нарастване на активността. За низходящата (намаляващата) фаза е характерно разширяването на полярните коронални дупки към по-ниски слънчеви ширини, което води до формирането на потоци от слънчев вятър с висока скорост.

В настоящото изследване разглеждаме две пълни слънчеви затъмнения – през 2006 и 2008 г., настъпили в низходящата фаза на 23-ия слънчев цикъл, и две затъмнения – през 2017 и 2019 г., настъпили в низходящата фаза на 24-ия слънчев цикъл. Тези затъмнения представляват особен интерес, тъй като месечните стойности на числото на слънчевите петна за затъмненията през 2006 и 2017 г. са сходни, както и стойностите за затъмненията през 2008 и 2019 г., съответно. Освен това 24-ият слънчев цикъл се характеризира с четвъртата най-ниска интензивност сред слънчевите цикли, за които се водят систематични наблюдения от 1755 г. насам.

Висококачествените компютърно обработени изображения на слънчевата корона в бяла светлина, получени по време на затъмнение, позволяват да се разграничат дребномащабни структури с ъглови размери около 5 дъгови секунди или по-малки. Контрастът между тези структури е много слаб и те остават неразличими при стандартните експозиции (Koutchmy et al., 1988; Druckmüller et al., 2006).

Слънчевата корона в бяла светлина се изследва въз основа на наклона на короналните стримери спрямо слънчевия екватор и на нейната елиптичност. За количествена характеристика на сплеснатостта се използва индексът на сплеснатост на Лудендорф, който служи като показател за дългопериодичните изменения на слънчевите магнитни полета.

Характеристики на пълните слънчеви затъмнения през 2006, 2008, 2017 и 2019 г.

Пълните слънчеви затъмнения (Total Solar Eclipses, TSE) са наблюдавани на различни места по света, избрани така, че да попадат в ивицата на пълното затъмнение. Короната в бяла светлина е наблюдавана с помощта на различни телескопи и камери при различни времена на експозиция. Експерименталните постановки и използваната наблюдателна апаратура са описани в Stoeva et al. (2018).

23-ти слънчев цикъл – минимум: август 1996 г.; максимум: ноември 2001 г.

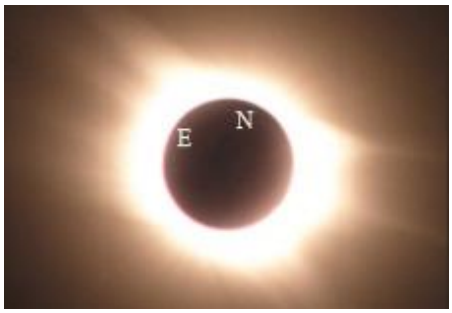
24-ти слънчев цикъл – минимум: декември 2008 г.; максимум: април 2014 г.; продължителност: точно 11 години.

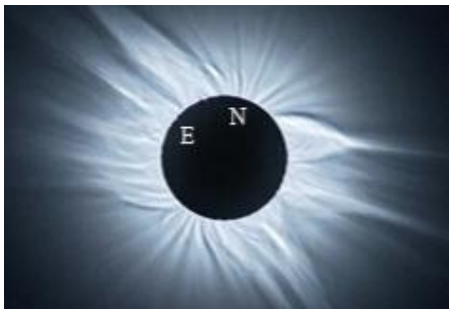
25-ти слънчев цикъл – минимум: декември 2019 г.; максимум: октомври 2024 г.

Наблюденията на пълното слънчево затъмнение от 29 март 2006 г. са проведени в близост до град Манавгат, Турция (φ = 36°45′27,59″ с. ш.; λ = 31°27′14,11″ и. д.; надморска височина: 2 m).

Пълно слънчево затъмнение от 29 март 2006 г. – 23-ти слънчев цикъл

- Времеви интервал след максимума на 23-тия слънчев цикъл (ноември 2001 г.): 4 години и 4 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 24-тия слънчев цикъл (декември 2008 г.): 2 години и 9 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за март: 17,3.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за март: 27,4.





Пълното слънчево затъмнение от 2006 г. настъпва в периода на намаляване на слънчевата активност – в низходящата фаза на 23-тия слънчев цикъл, близо до неговия минимум.

При затъмнението през 2006 г. полярните коронални струи (polar plumes) са добре развити както в северното, така и в южното полукълбо на короната. Протуберансите, възникващи и развиващи се на средни хелиографски ширини (25°–45°), се очертават ясно в основата на някои големи куполообразни структури. Оста на симетрия на короналните стримери от тип „шлем“ (helmet streamers) е наклонена към слънчевия екватор. Отклоненията от радиалното направление в западното полукълбо (21°) са по-големи от тези в източното полукълбо (8°). Съставното изображение е изготвено от 16 негатива, заснети в бяла светлина при времена на експозиция от 1/2000 s до 5 s (Stoeva et al., 2008).

Пълно слънчево затъмнение от 1 август 2008 г. – 23-ти слънчев цикъл

Наблюденията са проведени в близост до град Бийск, Алтайски край, Русия (φ = 51°58′ с. ш.; λ = 84°57′ и. д.; надморска височина: 360 m).

- Времеви интервал след максимума на 23-тия слънчев цикъл (ноември 2001 г.): 6 години и 9 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 24-тия слънчев цикъл (декември 2008 г.): 4 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 0,3.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 3,8.



Пълното слънчево затъмнение от 2008 г. също настъпва в низходящата фаза на слънчевия цикъл, като се има предвид, че 24-ят слънчев цикъл започва през декември 2008 г.

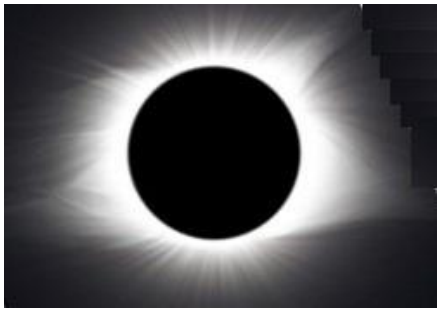
При затъмнението през 2008 г. короналните структури също се очертават ясно върху съставното изображение на короната в бяла светлина. Те се наблюдават в диапазона на хелиографските ширини от 19° до 48°. Отклоненията от радиалното направление в западното полукълбо (9°) са по-малки от тези в източното полукълбо (12°–18°).

„Голямото американско затъмнение“ (The Great American Eclipse) е първото пълно слънчево затъмнение, преминало през континенталната част на САЩ от 99 години насам. Ивицата на пълното затъмнение пресича страната от запад на изток – от щата Орегон до Южна Каролина. Пълната фаза на затъмнението започва в 13:06:19 ч. тихоокеанско лятно време (PDT), съответстващо на 20:06:19 ч. координирано универсално време (UTC). Най-голямата продължителност на пълната фаза е 2 минути и 41,6 секунди и е регистрирана в Карбъндейл, щата Илинойс.

За голямо слънчево затъмнение се говори, когато оста на лунната сянка преминава на най-малко разстояние от центъра на Земята. Затъмнението настъпва преди минимума между 24-ия и 25-ия слънчев цикъл. В сравнение с предходните седем слънчеви цикъла 24-ият цикъл се характеризира със сравнително ниска амплитуда на слънчевата активност.

Пълно слънчево затъмнение от 21 август 2017 г. – 24-ти слънчев цикъл

- Времеви интервал след максимума на 24-тия слънчев цикъл (април 2014 г.): 3 години и 4 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 25-ия слънчев цикъл (декември 2019 г.): 2 години и 4 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 32,6.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за август: 19,6.



Слънчевата корона в бяла светлина, Сейлъм, щата Орегон, САЩ. Снимка, направена от екипа на проф. Пасахоф от колежа „Уилямс“ в Портланд, щата Орегон.

Съставните изображения показват един ярък коронален стример от тип „шлем“ над източния край на слънчевия диск и два много ярки стримера от същия тип над западния край, отклонени към слънчевия екватор. Наблюдават се също тесни лъчеви структури, ориентирани почти радиално, както и полярни коронални дупки, изпълнени с полярни струи (polar plumes) (Pasachoff and Rusin, 2022).

За наблюдение на затъмнението е организирана специална експедиция до град Кинес, провинция Сан Луис, Аржентина, разположен в ивицата на пълното затъмнение.

Затъмнението е особено интересно, тъй като настъпва в период на много ниска слънчева активност – минимумът на низходящата фаза на 24-тия слънчев цикъл все още не е достигнат. Друга особеност на затъмнението е, че при много ниска слънчева активност

короната е силно издължена, а изригванията, които при максимума на слънчевата активност обикновено се сливат визуално с големите коронални структури и трудно се разграничават, могат да бъдат изследвани подробно.

Допълнителна трудност при наблюденията е обстоятелството, че затъмнението започва в късните следобедни часове, когато Слънцето и Луната се намират близо до хоризонта, където атмосферният слой, през който преминава светлината, е по-дебел.

Пълно слънчево затъмнение от 2 юли 2019 г. – 24-ти слънчев цикъл

- Времеви интервал след максимума на 24-тия слънчев цикъл (април 2014 г.): 5 години и 3 месеца.
- Времеви интервал до минимума на 25-ия слънчев цикъл (декември 2019 г.): 5 месеца.
- Месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за юли: 0,9.
- Изгладена месечна средна стойност на числото на слънчевите петна за юли: 3,5.



Слънчевата корона в бяла светлина по време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г., Аржентина (фотоапарат Canon 700D с обектив с фокусно разстояние 300 mm и неутрален филтър).

По време на пълното слънчево затъмнение на 2 юли 2019 г. се наблюдава протуберанс в хромосферата на средни хелиографски ширини. Той представлява структура, формирана от сложно преплетени магнитни силови линии, които задържат плътни концентрации от слънчева плазма над слънчевата повърхност. Магнитните му структури са закрепени към видимата слънчева повърхност и се простират навън, преминавайки през хромосферата и достигайки до короната.

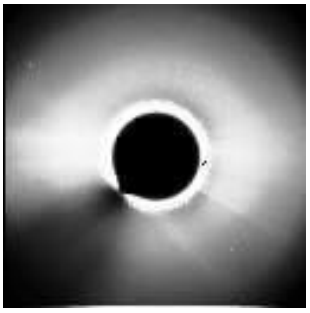
Резултати и анализ

Полярните коронални струи (polar plumes), куполообразните структури и короналните структури от тип „шлем“ (helmet structures) са основните морфологични образувания в слънчевата корона. Те се открояват ясно в съставни изображения, съставени от различен брой негатива, заснети в бяла светлина при различни времена на експозиция (Stoev et al., 2002; Stoeva et al., 2008).

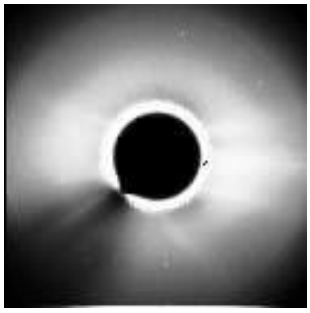
За да изследваме времето на живот на короналните структури, сравнихме изображения на короната в бяла светлина, получени с коронографа SOHO/LASCO C2, който регистрира короната на разстояния приблизително от 1,5 до 6 слънчеви радиуса. Изображенията са подбрани през интервал, равен на една четвърт от периода на слънчевото въртене: за деня на затъмнението, както и за 7 дни преди и 7 дни след него (Stoeva, Stoev, Kuzin, 2012; SOHO/LASCO – данни от наблюденията).

Наблюдаваните структурни изменения в изображенията от LASCO могат да бъдат резултат както от динамични промени в короната, така и от въртенето на Слънцето.

Това са три изображения, получени с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, заснети през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2006 г. Седем дни преди затъмнението в източното и западното полукълбо на Слънцето все още не се наблюдават добре развити коронални стримери.

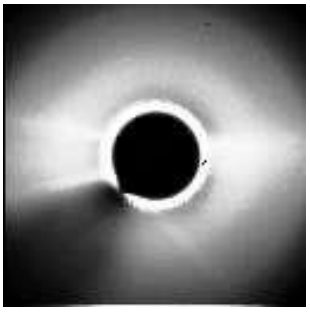

22 март, 2006

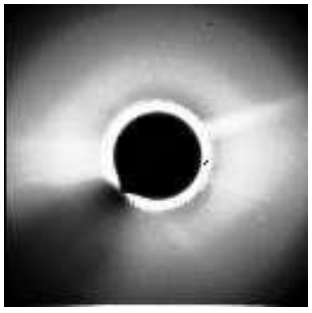

29 март, 2006

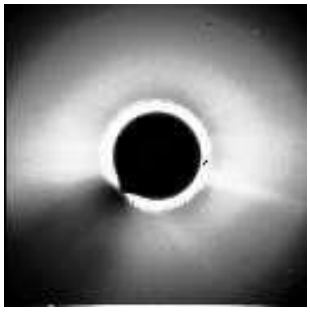

05 април, 2006

Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2006 г.

На изображенията, получени във връзка със затъмнението през 2008 г., се наблюдават промени в пространственото разположение и яркостта на короналните стримери.

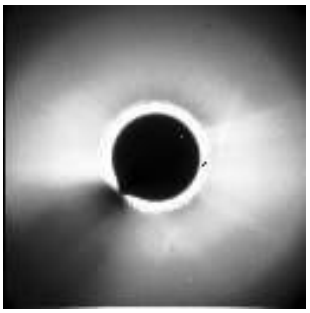

25 юли, 2008

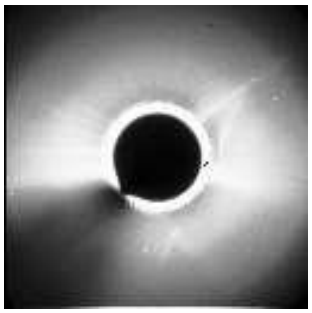

01 август, 2008

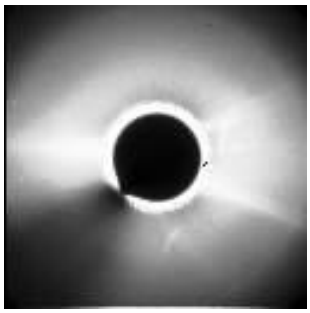

08 август, 2008

Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2008 г.

При затъмнението през 2017 г. не се наблюдават съществени изменения в структурата на слънчевата корона.

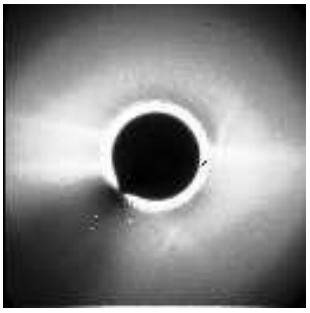

14 август, 2017


21 август, 2017


28 август, 2017

Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2017 г.

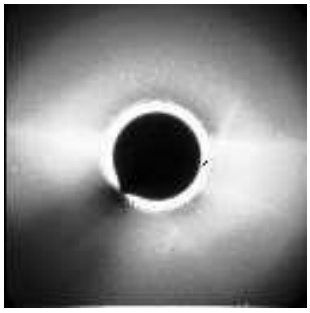
При пълното слънчево затъмнение през 2019 г., настъпило непосредствено преди минимума на слънчевата активност през декември 2019 г., се наблюдават коронални структури, разположени в непосредствена близост до равнината на хелиосферния екватор.



26 юни, 2019



2 юли, 2019



9 юли, 2019

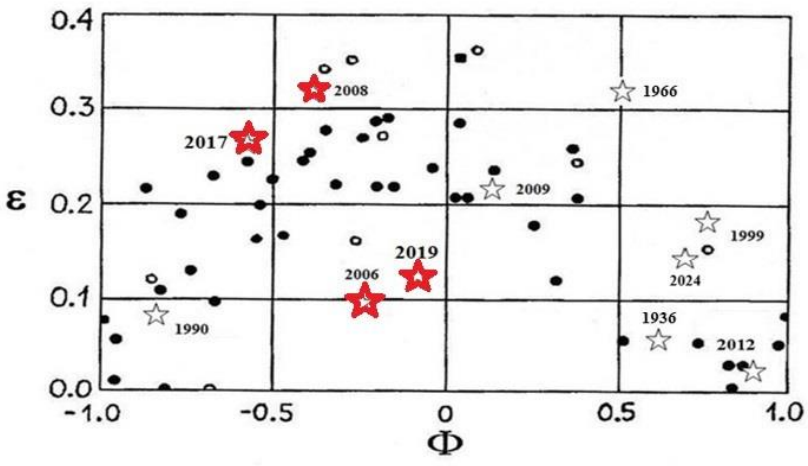
Короната в бяла светлина, наблюдавана с коронографа LASCO C2 на борда на космическата обсерватория SOHO, е представена чрез изображения, получени през интервали, равни на една четвърт от периода, за пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) през 2019 г.

Индексът на сплеснатост на Лудендорф е резултат от пространственото разпределение на едромащабните структури в бялосветлинната слънчева корона, сред които са короналните стримери и короналните дупки. Поради това той е свързан с магнитните полета на фотосферата, получени чрез екстраполация.

Степента на сплеснатост на слънчевата корона, която достига максимални стойности при минимум на слънчевата активност и обратно — намалява при повишаване на активността, може да се разглежда като косвена характеристика на полярното магнитно поле на Слънцето. Според теорията на динамото това поле също достига максималната си интензивност при минимума на слънчевата активност.

Таблица 1. Сплеснатостта на слънчевата корона ε и фазата на слънчевия цикъл Φ за пълните слънчеви затъмнения през 2006 и 2008 г., настъпили във фазата на спад на 23-ия слънчев цикъл, и за пълните слънчеви затъмнения през 2017 и 2019 г., настъпили във фазата на спад на 24-ия слънчев цикъл.

Изгладени месечни стойности на броя на слънчевите петна за година	**март 2006** 27.4	**август 2008** 3.8	**август 2017** 19.6	**юли 2019** 3.5
ε	0.098	0.320	0.27	0.13
Φ	- 0.25	- 0.04	- 0.60	- 0.08
Вид на короната	2 години и 9 месеца преди минимума (декември 2008 г.)	4 месеца преди минимума (декември 2008 г.)	2 години и 4 месеца преди минимума (декември 2019 г.)	5 месеца преди минимума (декември 2019 г.)



Индексите на сплеснатост на слънчевата корона ε като функция на фазата на слънчевия цикъл Φ за пълните слънчеви затъмнения през 2006, 2008, 2017 и 2019 г. са представени с червени звездички.

Литература:

1. Druckmüller, M., Rušin, V., Minarovjech, M., Saniga, M.: 2006, Contrib. Astron. Obs. Skaln. Pleso 36, 31.
2. Fainshtein V.G., Ivanov E.V., Relationship between CME Parameters and Large-Scale Structure of Solar Magnetic Fields, Sun and Geosphere, 2010; 5(1): 28–33 ISSN 1819-0839.
3. https://lasco-www.nrl.navy.mil/index.php?p=get_data
4. Koutchmy, O., Koutchmy, S., Nitschelm, C., Sykora, J., Smartt, R.S.: 1988, Image processing of coronal pictures. In: Altrock, R.C. (ed.) Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics, Proc. 9th Sac Peak Summer Workshop, NSO, Sunspot, 256.
5. Pasachoff Jay, 2009, Solar eclipses as an astrophysical laboratory, Nature, Vol 459j11 June 2009jdoi:10.1038/nature07987.
6. Pasachoff, J., Rusev, V., 2022, White-Light Coronal Imaging at the 21 August 2017 Total Solar Eclipse, Solar Physics (2022) 297:28, https://doi.org/10.1007/s11207-022-01964-z.
7. Simnett, G.M., The relationship between prominence eruptions and coronal mass ejections, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 62, Issue 16, 2000, Pages 1479-1487, ISSN 1364-6826, https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00088-2.
8. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, “White light corona at different phases of the solar cycle”, Sun and Geosphere, 6(1), 2011, pp. 33–35, ISSN 1819-0839.
9. Stoeva P., A. Stoev, S. Kuzin, Solar Corona In White Light During Five Total Solar Eclipses, Sun and Geosphere, The International Journal of Research and Applications,Vol.7 - No.1 – 2012, pp. 81–84, Editor-in-Chief: Atila Ozguc, Guest Editors: Katya Georgieva, Vladimir Obridko, Georgeta Maris, Tamara Breus, Rositza Koleva, Yurdanur Tulunay, ISSN: 1819-0839.
10. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, Y. Shopov, N. Kiskinova, N. Stoyanov, A. Pertsov,” Investigation of the white light coronal structure during the total solar eclipse on March 29, 2006”, International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System, Varna, Bulgaria, 17–22 September 2006, doi:10.1016/j.jastp.2007.08.051, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics v. 70, 2008, pp. 414–419.
11. Stoeva Penka, Alexey Stoev, Sergey Kusin, Beshir Marzouk, Andrey Pertsov, Mohamed Semeida, 2018, Structure and dynamics of the solar corona observed during different phases of the solar cycle, 41st Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", March 12-16, 2018 , Apatity, Russia, Proceedings of the 41st Annul Seminar, http://pgia.ru/seminar, pp 69-75. ISSN 2588-0039.

ПЪЛНОТО СЛЪНЧЕВО ЗАТЪМНЕНИЕ НА 12 АВГУСТ 2026 Г.: НАБЛЮДЕНИЯ, ЕКСПЕРИМЕНТИ, ПЪРВИ РЕЗУЛТАТИ

Алексей Стоев[1], Пенка Мъглова[1], Мохамед Семеида[2], Ахмед Абулвафа[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Национален изследователски институт по астрономия и геофизика (NRIAG), Хелуан, Кайро, Египет
e-mail: stoev52@abv.bg

Ключови думи: *Пълно слънчево затъмнение на 12 август 2026 г., бяла и монохроматична корона, метеорологични и астрометрични параметри*

Резюме: *Тук представяме предварителните резултати от експериментите, проведени по време на пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г., с. Торкемада, провинция Паленсия, автономна област Кастилия и Леон, Испания.*

Използвайки серия от 16 снимки на бялата корона с различна експозиция (от 1/250 до 4 сек., ISO100) бе определен коефициента на Лудендорф (Flattening Index, Ɛ) – 0.035. В момента сме в слънчев цикъл 25 (25-ият от 1755 г. насам), който започна през декември 2019 г. Слънцето е преминало максимума в своята активност през октомври 2024 г., и сега е в своята низходяща фаза.

Температурата на въздуха спадна само с 1°C 56 мин след края на пълната фаза, докато слънцето залезе.

Получените изображения ни дават възможност да изследваме структурата на слънчевата корона след максимума на слънчевата активност и да я сравним с предишни наблюдения.

THE TOTAL SOLAR ECLIPSE OF AUGUST 12, 2026: OBSERVATIONS, EXPERIMENTS, AND PRELIMINARY RESULTS

Alexey Stoev[1], Penka Maglova[1], Mohamed Semeida[2], Ahmed Abulwfa[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]National Research Institute of Astronomy and Geophysics (NRIAG), Helwan, Cairo, Egypt
e-mail: stoev52@abv.bg

Keywords: *Total solar eclipse on August 12, 2026, white and monochromatic corona, meteorological and astrometric parameters*

Abstract: *Here, we present the preliminary results from experiments conducted during the total solar eclipse on August 12, 2026, in the village of Torquemada, Palencia Province, Castile and León, Spain.*

Using a series of 16 images of the white-light corona taken with varying exposures (ranging from 1/250 s to 4 s, at ISO 100), the Ludendorff coefficient (Flattening Index, ε) was determined to be 0.035. We are currently in Solar Cycle 25 (the 25th cycle since 1755), which began in December 2019. The Sun reached its peak activity in October 2024 and is now in its declining phase.

Air temperature dropped by only 1°C in the 56 minutes following the end of totality, as the Sun set.

The images obtained allow us to study the structure of the solar corona following the peak of solar activity and to compare it with previous observations.

Въведение

Пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г. бе първото пълно слънчево затъмнение, видимо от Европа от 1999 г. насам (и първо за континентална Испания от 1905 г.). В България явлението може да се наблюдава само като частично слънчево затъмнение, малко преди залез Слънце от малка територия в северозападната част на страната.

Ивица на тоталитета: началото на ивицата на пълната сянка започва от Северна Русия (Якутия), преминава през Северния ледовит океан, Гренландия, Исландия, Северна Португалия и Северна Испания и завършва малко след остров Малорка, в акваторията на Средиземно море.

Продължителност на пълната фаза: Най-голяма продължителност на пълната фаза (2 минути и 18 секунди) бе регистрирана в Северния Атлантик, а в Северна Испания (около град Овиедо) пълната фаза продължи около 1 минута и 48 секунди.

Всъщност, на 12 август 2026 г. се случи нещо изключително рядко в историята на хелиофизиката – наблюдавано бе „двойно" слънчево затъмнение. Часове преди земните наблюдатели в Европа и по света да видят пълната фаза, истинската Луна пресече зрителното поле на европейския спътник PROBA-3, докато двата му субспътника вече поддържаха режим на изкуствено затъмнение. Луната покри слънчевия диск в продължение на 8 минути и 40 секунди (!), което е почти четири пъти по-дълго от максималната пълна фаза на Земята (2 мин 18 сек).

Така, европейската космическа мисия PROBA-3 на ESA изигра революционна роля в подготовката и прогнозирането на формата на короната за затъмнението на 12 август 2026 г. Какво обаче представлява космическата мисия PROBA-3? Това е първата в света космическа мисия за прецизен съвместен полет. Двата апарата летят на разстояние един от друг точно на 150 m един от друг с милиметрова точност. Те се състоят от: Апарат-окултер (Occulter): Действа като изкуствена Луна, блокирайки яркия диск на Слънцето и Апарат-коронограф (Coronagraph): Насочва коронографа ASPIICS директно към Слънцето.

Това позволява на астрономите да създадат изкуствени слънчеви затъмнения „по поръчка", продължаващи до 6 часа на орбита, избягвайки атмосферните смущения на Земята. Така бе направена предварителна прогноза за вида на слънчевата корона две седмици по-рано. И тъй като на Слънцето му отнема около 27 дни, за да направи едно пълно завъртане около оста си, изследователите използваха този уникален астрономически прозорец за предварителни снимки. На 30 юли 2026 г. (точно две седмици преди реалното затъмнение) PROBA-3 засне вътрешната слънчева корона от позиция, която съвпадаше перфектно с тази страна на Слънцето, която щеше да бъде обърната към Земята на 12 август. Получените изображения бяха предоставени на астрономите по целия свят като точна визуална картина на очакваната корона дни преди събитието.

Астрономическата Обсерватория и Планетариум „Юрий Гагарин" в Стара Загора и Института за Космически Изследвания и Технологии – БАН организираха **Наблюдателна експедиция „Пълно слънчево затъмнение 2026"** до с. Торкемада, провинция Паленсия, автономна област Кастилия и Леон, Кралство Испания – част от усилията на международен екип от специалисти от България, Франция (Институт по Астрофизика, Париж), Русия (Физически Институт „Лебедев", Москва) и Египет (Национален Изследователски Институт по Астрономия и Геофизика, Хелуан) да наблюдават интересни и важни за науката астрофизически процеси във вътрешната слънчева корона по време на пълни слънчеви затъмнения.

Научна програма:

- Фотографски наблюдения на бялата корона;
- Фотометрия на далечната слънчева корона;
- Определяне на астрометричните параметри на явлението „пълно слънчево затъмнение" на 12 август 2026 г.;
- Спектрофотометрия на емисионната слънчева корона в „червената" и „зелена" линия (Fe X 6374 Å и FeXIV 5303Å);
- Метеорологични наблюдения в конуса на лунната сянка;
- Фотометрия на небето и ореолни явления във фазовата еволюция на затъмнението.



Фиг. 1. Ивицата на тоталитета на пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г. върху територията на Кралство Испания

Ефемериди на пълното слънчево затъмнение:

Начало на частично затъмнение: 19:33:53 Local Time
Начало на пълно затъмнение 20:29:08
Максимално затъмнение 20:29:59
Край на пълно затъмнение 20:30:51
Край на частично затъмнение 21:22:35
Продължителност на пълното затъмнение (мин:сек) 1:43
Продължителност на затъмнението (ч:мин) 1:49

Наблюдателна апаратура

За наблюдение на **Слънчевата корона в бяла светлина** използваме 500 mm обектив Canon с фокален редуктор 2x, монтиран на фотоапарат Canon EOS R6 Mark II. Снимките се правят с различна експозиция – къса за вътрешната корона и дълга за външната корона. По този начин можем да получим съставно изображение и да изследваме структурата на короната в бяла светлина. С този обектив се прави и серия от фотографии, необходими за **астрометричните измервания**.

За **емисионната корона** се използва 600 mm SIGMA обектив, монтиран на камера Canon EOS 80D с тясноивичен интерференчен филтър с дължина на вълната на зелената коронална линия на Fe XIV 530,3 nm, която се отнася до 13 пъти йонизирано желязо. Неговото присъствие показва екстремни плазмени температури от приблизително 1,8 до 2 милиона Келвина. 600 mm Canon обектив, монтиран на камера Canon EOS R8 с тясноивичен интерференчен филтър, се използва за наблюдение на червената коронална линия на 9 пъти йонизирано желязо Fe X 637,4 nm. Тази спектрална линия доказва, че външната атмосфера на Слънцето достига екстремни температури от приблизително 1 милион Келвина.

Обективът за цялото небе **(All sky camera**) е SAMYANG 12 mm, монтиран на фотоапарат Canon EOS 700 D – използва се за заснемане на изображение на 360-градусовия ореол около сянката на луната на хоризонта, по време на пълното слънчево затъмнение.

Осветеността в луксове (lx) се измерва с ILLUMINANCE METER UNI-T, UT381A.

Визуални астрометрични наблюдения – Хронометрирането на покриването и откриването на слънчевите петна по време на частичните фази на затъмнението се извършва чрез визуални наблюдения с телескоп CELESTRON ULTIMA 100/1000 mm и слънчев филтър Orion. Целта е точното определяне на взаимното положение на центровете на Слънцето и Луната, необходимо за уточняване орбитата на Луната.

Температурата и влажността на въздуха по време на затъмнението се измерват с термо-хигрометър DC 103 на височина 1 m и 2 m.

Основни наблюдателни резултати

Фотографските наблюдения на бялата корона са едни от най-важните наблюдателни експерименти, осъществени по време на експедицията. Изображенията на бялата корона, обработени с компютър ни позволяват да различим малко-мащабни структури, контрастът между които е много малък и се губи при стандартни експозиции (Koutchmy et al., 1988, Druckmüller et al., 2006). По-късната им обработка позволява да се направи детайлна снимка на вътрешната и външна корона полета (Pasachoff, 2018), както и да се определи сплеснатостта на слънчевата корона и коефициента на свързаност с актуалния 25-ти слънчев цикъл. Човешкото око и стандартните камери не могат да уловят едновременно огромния динамичен диапазон на интензитета на слънчевата корона – от изключително ярката вътрешна корона (близо до повърхността) до невероятно бледите структури във външната слънчева корона.

Както е известно, ексцентрицитетът на слънчевата корона (определяща доколко формата ѝ се отклонява от идеалния кръг към елипса) зависи пряко от фазата на 11-годишния цикъл на слънчевата активност (Stoeva et al., 2008, Stoeva et al., 2011, Stoeva and Stoev, 2018). По време на затъмнението на 12 август 2026 г., Слънцето бе в период, отстоящ малко повече от година след максимума на 25-я цикъл. Специфичният цифров индекс на ексцентрицитета бе изчислен чрез анализ на фотометричните данни на т. н. „бяла" корона. Макар и с изразена кръгова форма, на съставните фотографии отчетливо се вижда сложната структура на короната, изпълнена с огромни магнитни примки, динамични протуберанси и сложни лъчисти структури, излизащи под всякакви ъгли по целия слънчев лимб.

Специфичният цифров индекс на ексцентриситета се изчислява класически чрез анализ на фотометричните данни. Математическата формула за определяне на сплеснатостта на слънчевата корона е предложена от германския астроном Ханс Лудендорф (Ludendorff, 1928) през 1928 г. и остава златен стандарт в класическата астрофизика за количествено описание на

формата на короната. Лудендорф въвежда индекс на сплеснатост, означен с Ɛ, който отразява как се променя формата на короната на различно разстояние от центъра на Слънцето. Използвайки серия от 16 снимки на слънчевата корона с различна експозиция (от 1/250 до 4 сек, ISO100) бе определен индексът на сплеснатост (Flattening Index, (Ɛ)) на короната на 12 август – 0.035. Това означава, че геометрично короната е почти идеална сфера, като разликата между екваториалния и полярния ѝ диаметър е близка до нула. Това предопределя, короната да има сравнително симетрична форма и структура, разперена във всички (Фиг. 2 а, б).



Фиг. 2 а, б. Фотография на слънчевата корона в бяла светлина (а)
и съставно изображение на слънчевата корона (16 фотографии с експозиции от 1/500 до 4 сек), ISO100 (б)

Сравнителен анализ на формата на короната с прогнозни изображения от Predictive Science Inc., PSI

Прогноза от Predictive Science Inc. (PSI): Черно-белите симулации на магнитохидродинамичните модели от очертават линиите на еднакъв интензитет, потвърждават изключително ниския индекс на сплеснатост на Лудендорф за 2026 г. Изображението, представено на фиг. 3 показва прогноза за това какво можем да очакваме да видим по време на пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г. Това разкрива слабата външна атмосфера на Слънцето, която се вижда тук под формата на бели ивици, радиално излизащи от центъра навън (Фиг. 3).



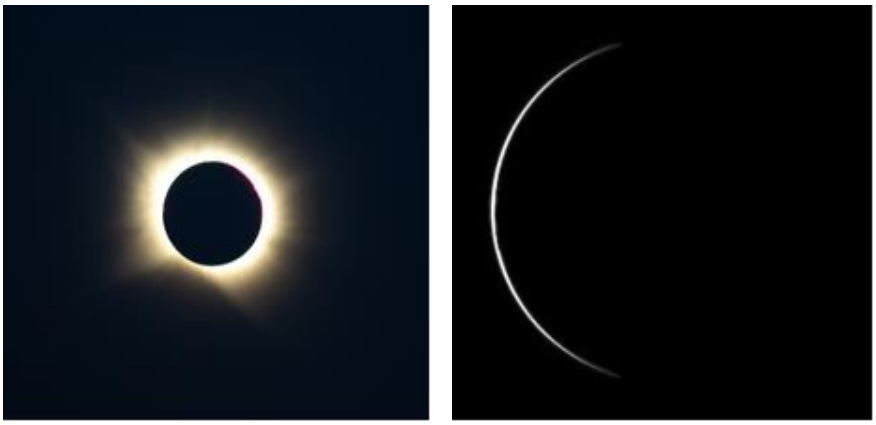
Фиг. 3. Прогноза на вида на слънчевата корона на компанията Predictive Science Inc.,
направена на 9 август за предстоящото на 12 август затъмнение.

В горния десен ъгъл е посочен моментът на последната актуализация на прогнозата: 9 август 2026 г. в 22:00 ч. UTC.

По време на пълната фаза се разкриват структури в короната, оформени от магнитното поле на Слънцето. Това означава, че слънчевите затъмнения предоставят рядка възможност да се провери дали компютърните симулации точно отразяват променливата магнитна среда на Слънцето. За да изготви подобна прогноза, компанията Predictive Science Inc. използва сложен компютърен модел на слънчевото магнитно поле. Сред многобройните входни данни за този модел са измервания, направени от мисията Solar Orbiter, ръководена от Европейската космическа агенция (ESA). Прогнозите се актуализират на всеки няколко часа въз основа на най-новите налични измервания.

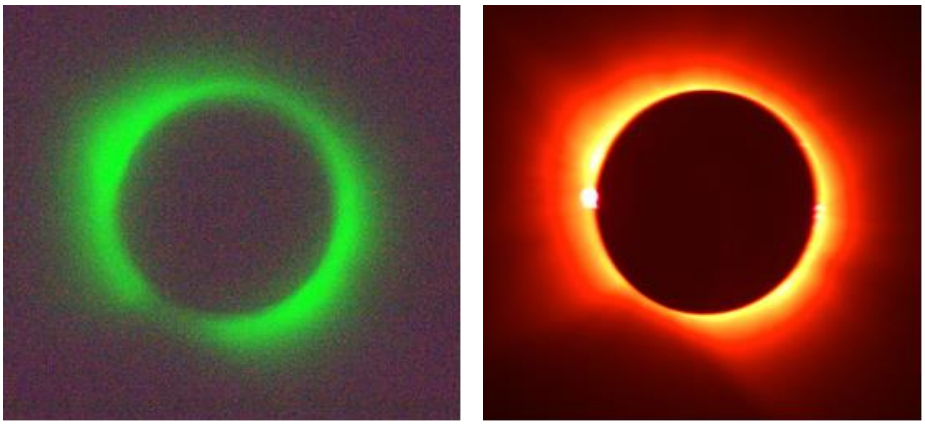
Астрометрични наблюдения

Получена е серия от фотографии, фиксирани във времето, на частичните фази, 10 сек преди началото на пълната фаза. На фиг.4 се вижда една от тези фотографии. По-късната обработка на изображенията ще ни даде възможност да получим точният геометричен център на Лунния диск, което е необходимо за определяне на числените коефициенти на диференциалните уравнения, описващи движението на Луната.



Фиг. 4. Снимка на слънчевата корона в бяла светлина (фотометрична програма) и момента на затъмнението 5 сек преди началото на пълната фаза (основен резултат от астрометрична програма)

Наблюдение на емисионната слънчева корона в „зелената" и „червена" линия (FeXIV 5303Å и Fe X 6374 Å)



Фиг. 5. Емисионната слънчева корона в „зелената" и „червена" линия (FeXIV 5303Å и Fe X 6374 Å)

Емисионните линии в короната на Слънцето се наблюдават с цел измерване на температурното разпределение, енергийното съдържание и динамиката на слънчевата атмосфера.

Структурата на „зелената" и „червена" линия са различни, тъй като се дължат на различни процеси. И двете линии следват 11-годишния слънчев цикъл. При **слънчев минимум** глобалното магнитно поле на Слънцето е дипол. При липсата на значителни активни области или сложни магнитни полета, които да нагряват плазмата, зелената линия става изключително слаба и изтеглените структури в короната се движат от средни ширини към екватора, докато светенето в червената линия се ограничава в екваториалната област. При **слънчев максимум** магнитното поле става хаотично. Това поражда магнитни примки и слънчеви изригвания. Тази екстремна магнитна активност интензивно нагрява големи обеми от короната, което води до рязко повишаване на йонизацията и съответно интензитета на зелената линия (13 кратно йонизирано желязо). Структурите на зелената корона се движат към полюса и го достигат точно по време на максимум, когато глобалното магнитно поле сменя полярността си – белег за пика в слънчевата активност (Voulgaris et al., 2010).

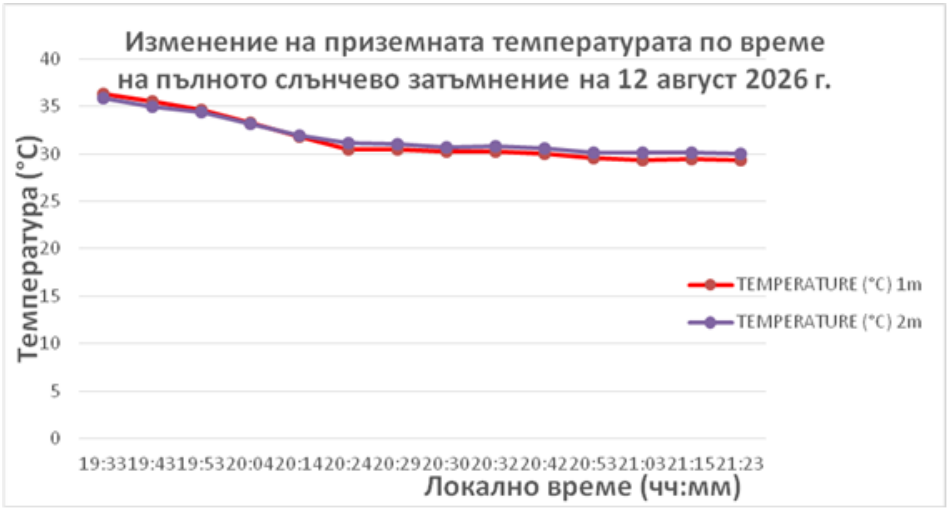
Сравняването на червената и зелена линия дава карта на разпределение на температурата в короната (гореща - зелена линия спрямо по-хладната червена). Това дава по-подробна, триизмерна картина за хода на слънчевия цикъл, отколкото преброяването на слънчевите петна.

Метеорологични наблюдения в конуса на лунната сянка

По време на пълната фаза на слънчевото затъмнение на 12 август 2026 г., **температурите на въздуха в приземния слой** се очакваше да спадат средно с 2,8°C до 6,8°C в зависимост от локалните условия, облачността и влажността. По принцип, внезапното спиране на слънчевата радиация по време на пълната фаза води до бързо охлаждане на повърхността и най-ниските слоеве на атмосферата. Рязкото спадане на температурата води до промяна в посоката или скоростта на приземния вятър поради нарушаване на термичната конвекция. Локални разлики: най-силен температурен спад се наблюдава в райони с ясно небе и суша, докато във влажни или крайбрежни зони промяната е по-малко изразена (Stoev, Stoeva, Kuzin, 2012) По време на затъмнението, поради това, че явлението се случи преди залез слънце, бяха наблюдавани следните термични данни:

Понижение на температурата – температурата на въздуха падна само с 1°C 56 мин след края на пълната фаза, докато слънцето залезе. Обикновено температурата достига минимум няколко минути след пълната фаза и след това отново се повишава, но тук не наблюдаваме повишение тъй като затъмнението е по време на залеза на Слънцето. На територията на наблюдателната площадка бе регистрирана постоянна влажност на двуметровия приземен слой – 20%.

Атмосферни ефекти – слабото охлаждането на въздуха по време на пълната фаза на затъмнението стабилизира граничния слой на тропосферата, което доведе до затихване на приземния вятър, без при това да доведе до повишаване на относителната влажност. Ниските купести облаци (Cumulus) които се появиха частично на хоризонта се разсеяха още когато Луната покри 15% от Слънцето, което е свързано с изстиването на земята – процес който спира да подхранва облакообразуването.



Фиг. 6. Температурен режим на двуметровия приземен слой атмосфера по време на пълната фаза на слънчевото затъмнение

Осветеност на небето. Ореолни явления и свързани оптични ефекти

По време на пълното слънчево затъмнение осветеността на небето и околната среда намаля рязко, но не достигна абсолютната тъмнина на нощта.

Степен на притъмняване: Осветеността намаля с няколко порядъка (до нива, сравними с дълбок здрач или малко след слънчев залез.

Хоризонтът: В центъра на лунната сянка (където бе позиционирана наблюдателната площадка) небето изглеждаше тъмно синьо до черно в областта около Слънцето, но ниският хоризонт във всички посоки остана оцветен в жълто-оранжеви или червени нюанси (като при залез), защото светлината там попадаше от незасегнати от сянката области извън обхвата на лунния конус.

Звезди и планети: По време на пълната фаза на небето станаха видими най-ярките звезди и планети (Венера, Юпитер, както и ярки звезди в близост до затъмненото Слънце).

Измерване на осветеността на небето в луксове – чрез този метод бе измерено общото количество видима светлина, което достига до земната повърхност в дадена точка. Той показа колко точно „притъмнява“ небето по време на пълната фаза на затъмнението.

Инструменти: луксметър със специализирано приложение, използващ вградения сензор за светлина – 2 бр.

Единица мярка: lx.

Проследени бяха светлинните криви по време на затъмнението в две зони – зенит и хоризонт (около подслънчевата точка). Зрителния ъгъл на луксметрите бе ограничена до окръжност от небето с размер 20 дъгови градуса (виж Фиг. 7).



Фиг. 7. Промяна на осветеността на небето по време на фазовата еволюция на пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г.

Благодарности

Бихме искали да изкажем специални благодарности на Димитър Стоев, Мина Стоева, Боряна Тодорова, Филип Спасов, София Спасова, Александра Стоева, Калина Спасова и Доналд Нелсон за участието в организацията на експедицията за наблюдение на пълното слънчево затъмнение на 12 август 2026 г. в Торкемада и провеждането на експериментите.

Литература:

1. Koutchmy, O., Koutchmy, S., Nitschelm, C. H., Sýkora, J., and Smartt, R.N. “Image processing of coronal pictures,” in Solar and Stellar Coronal Structure and Dynamics; A Festschrift in Honor of Dr. John, W. Evans, eds R. C. Altrock (Nat. Solar Observatory/Sacramento Peak, Sunspot, N. M.),1988, pp. 256–266.US patent 5876348 Blood pressure monitoring apparatus, Yoshihiro Sugo, Takeshi Sohma, Hiromitsu Kasuya, Rie Tanaka, Tokyo, Japan.
2. Druckmüller,M., Rušin, V., and Minarovjech,M. A new numerical method of total solar eclipse photography processing. Contr. Astron. Obs. Skalnaté leso 36, 2006, pp. 131–148.
3. Pasachoff, J. M. Science at the Great American Eclipse. Astron. Geophys. Roy. Astron. Soc. 59, 4.19–4.23. doi: 10.1093/astrogeo/aty191, 2018.
4. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, Y. Shopov, N. Kiskinova, N. Stoyanov, A. Pertsov,” Investigation of the white light coronal structure during the total solar eclipse on March 29, 2006”, International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System, Varna, Bulgaria, 17 – 22 September 2006, doi:10.1016/j.jastp.2007.08.051, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics v. 70, 2008, pp. 414–419.
5. Stoeva, P., A. Stoev, S. Kuzin, “White light corona at different phases of the solar cycle”, Sun and Geosphere, 6(1), ISSN 1819-0839, 2011, pp. 33–35.
6. Stoeva Penka, Alexey Stoev, Sergey Kusin, Beshir Marzouk, Andrey Pertsov, Mohamed Semeida, 2018, Structure and dynamics of the solar corona observed during different phases of the solar cycle, 41st Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", March 12-16, 2018 , Apatity, Russia, Proceedings of the 41st Annul Seminar, http://pgia.ru/seminar, pp. 69–75.
7. Ludendorff, H., Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Kl., 16, 1928, 185.
8. Voulgaris, A., Athanasiadis, T., Seiradakis, J.H. et al., A comparison of the red and green coronal line intensities at the 29 march 2006 and the 1 august 2008 total solar eclipses: considerations of the temperature of the solar corona, Sol Phys (2010) 264: 45. https://doi.org/10.1007/s11207-010-9575-7.
9. Stoev A., Stoeva P., Kuzin S.,Total Solar Eclipses and Atmospheric Boundary Layer Response, Sun and Geosphere, The International Journal of Research and Applications,Vol.7 - No.1 – 2012, pp. 103–107, Editor-in-Chief: Atila Ozguc, Guest Editors: Katya Georgieva, Vladimir Obridko, Georgeta Maris, Tamara Breus, Rositza Koleva, Yurdanur Tulunay, ISSN: 1819-0839.

ГЕОКОСМИЧЕСКИ МОНИТОРИНГ НА ОКОЛОЗЕМНОТО КОСМИЧЕСКО ПРОСТРАНСТВО: НАБЛЮДЕНИЯ, КОНТРОЛ, ЗАЩИТА

Огнян Огнянов, Десислава Тенева, Пенка Мъглова, Алексей Стоев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: dessi_bg@yahoo.com; penm@abv.bg; stoev52@abv.bg

Ключови думи: *Геопространствен мониторинг, космически отломки, астероидна опасност, информационни технологии, сателитни системи за наблюдение, космическа сигурност*

Резюме: *В статията е представен цялостен преглед на съвременните системи за геопространствен мониторинг в близкоземното пространство, насочени към защита от космически отломки и астероидни опасности. Прегледът разглежда съществуващите и нововъзникващите технологии, включително методи за наблюдение, активно смекчаване на заплахите и използването на информационни системи и технологии. Особено внимание е обърнато на ролята на изкуствения интелект и автоматизацията за подобряване на ефективността на мониторинга.*

GEOSPATIAL MONITORING OF NEAR-EARTH SPACE: OBSERVATION, CONTROL AND PROTECTION

Ognyan Ognyanov, Desislava Teneva, Penka Maglova, Alexey Stoev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: dessi_bg@yahoo.com; penm@abv.bg; stoev52@abv.bg

Keywords: *Geospatial monitoring, space debris, asteroid hazard, information technologies, satellite surveillance systems, space security*

Abstract: *The paper presents a comprehensive overview of contemporary geospatial monitoring systems in near-Earth space, aimed at providing protection against space debris and asteroid hazards. The review examines existing and emerging technologies, including observation methods, active threat mitigation approaches, and the application of information systems and technologies. Particular attention is paid to the role of artificial intelligence and automation in improving monitoring efficiency.*

Въведение

Съвременните предизвикателства изискват интердисциплинарни решения, където информационните технологии играят ключова роля в обработката на данни и управлението на системите за мониторинг. Близоземното пространство днес е динамично променяща се среда, характеризираща се с нарастващото присъствие както на естествени, така и на изкуствени обекти. Нарастващият брой действащи космически апарати, нарастващата популация на космически отломки и редовното откриване на нови потенциално опасни астероиди (ПОА) поставят сериозни предизвикателства пред осигуряването на безопасността на космическите дейности и защитата на Земята от потенциалните катастрофални последици от сблъсъци [1].

Геокосмическият мониторинг на близоземното пространство като сложна научно-техническа задача включва следните ключови области [2]:

- откриване и каталогизиране на изкуствени и природни обекти;
- определяне и прогнозиране на техните орбитални параметри;
- оценка на рисковете от сблъсъци и потенциалните щети;
- разработване и прилагане на методи за защита срещу идентифицирани заплахи.

Към началото на 2026 г. броят на каталогизираните обекти от космически отломки с размер над 10 см надхвърли 40 000, докато броят на проследените потенциално опасни астероиди достигна 2998. Наблюдава се постоянна възходяща тенденция, обусловена както от подобреното оборудване за наблюдение, така и от продължаващото замърсяване на околоземното пространство, причинено от човека [3].

Тази статия представя аналитичен преглед, систематизиращ най-новите постижения в геопространствения мониторинг и защитата от космически опасности. Целта на прегледа е да се подчертаят ключови технологични тенденции, да се оцени техният потенциал и да се идентифицират бариерите пред внедряването им. Материалът се основава на анализ на научни публикации, данни от международни проекти (като ISON и MASTER) и публични доклади от космически агенции.

Съвременно състояние на околоземното космическо пространство

Космическите отпадъци включват нефункциониращи изкуствени спътници, отработени степени на ракети-носители, фрагменти в резултат на сблъсъци и експлозии и технологични елементи, загубени по време на космически дейности. Разпределението на тези обекти по орбита и размер представя сложна картина, която оказва значително влияние върху дългосрочната устойчивост на космическите дейности [4].

Динамиката на растеж на броя на каталогизираните обекти от космически отпадъци през последните години отразява както нарастващата активност в космоса, така и подобрените възможности за наблюдение [5].

Особено безпокойство представлява нарастващият брой фрагменти в резултат на сблъсъци и умишленото унищожаване на спътници по време на тестове на противосателитни оръжия [6].

Астероиди с минимално разстояние за пресичане със Земята (MOID) по-малко от 0,05 AU (~7,5 милиона km) и абсолютна величина H < 22 (съответстваща на диаметър по-голям от 140 m) се считат за потенциално опасни. Сблъсък с такъв обект може да доведе до регионална или глобална катастрофа.

А. Системи за наблюдение на близкоземното пространство

Ядрото на глобалната система за наблюдение на близкоземното пространство са наземните наблюдателни съоръжения, включително оптични телескопи и радарни станции [7].

Космическите системи за наблюдение предлагат няколко предимства пред наземните съоръжения, включително липсата на атмосферни изкривявания, възможността за непрекъснато наблюдение и по-благоприятно геометрично положение спрямо наблюдаваните обекти [8].

Ефективното наблюдение на близкоземното пространство изисква интегрирането на различни наблюдателни системи и обмена на данни между тях. В момента съществуват няколко международни инициативи за координиране на усилията в тази област.

Б. Международни инициативи за координация на мониторинга

Ефективното наблюдение на близкоземното пространство изисква глобално сътрудничество. Ключови активни инициативи включват:

Проект ISON (Международна научна оптична мрежа)

Най-голямата международна мрежа от оптични обсерватории, обединяваща 23 обсерватории в Европа, Азия, Африка и Северна и Южна Америка. Основни цели:

- Проследяване на над 10 000 обекта (GEO, HEO, LEO), включително космически отломки и астероиди.
- Автоматизирано управление на телескопи чрез софтуер (напр. FORTE) и обработка на данни с помощта на изкуствен интелект.

Мрежа от обсерватории на БРИКС

Разработена от 2019 г. като част от сътрудничеството на БРИКС.

Пример: Руско-китайски наблюдения на фрагменти от стадий на Кентавър са първата стъпка към създаването на единна мрежа [14].

Цели: Съвместни кампании за проследяване на отломки и опасни астероиди, стандартизация на данните.

Програма на ESA

Програма на Службата за космически отломки на ESA: координация на радарни и телескопни данни, включително сътрудничество с ISON.

Методи за защита от космически отломки и астероидни опасности

Пасивните методи за защита са насочени към минимизиране на вероятността от образуване на нови космически отломки и намаляване на риска от сблъсъци със съществуващи обекти.

Активните методи за защита включват системи за избягване на сблъсъци и технологии за активно отстраняване на отломки.

Ефективността на маневрите за избягване зависи от точността на определяне на орбитата, навременността на откриване на заплахата и маневреността на космическия кораб [9].

Основната стратегия за защита от астероидни опасности е ранното откриване на потенциално опасни обекти и определянето на техните орбитални и физически характеристики.

За да се предотврати сблъсък на потенциално опасен астероид със Земята, неговата траектория трябва да бъде променена, за да се осигури безопасно прелитане [10].

Информационни технологии в системите за защита от космически отломки и астероидни опасности

Съвременните системи за геопространствен мониторинг и защита от заплахи са невъзможни без използването на съвременни информационни технологии (ИТ). Те позволяват събирането, обработката, анализа и разпространението на данни, както и автоматизираното управление на системите за наблюдение.

А. Софтуер за управление на мрежата от телескопи

Специализираните софтуерни системи, които координират работата на разпределените обсерватории, играят ключова роля. Сред най-успешните примери:

Проектът ISON

Използва автоматизирана система за управление на роботизирани оптични обсерватории, която включва:

- планиране на наблюденията, като се вземат предвид метеорологичните условия и приоритетите на задачите;
- обработка на изображения в реално време с помощта на алгоритми за машинно обучение за идентифициране на обекти;
- интеграция с бази данни за орбитални параметри за бързи актуализации на каталога [15].

MASTER Global Network

Базиран на концепцията за многофункционален астрономически комплекс с динамично интегрирана база данни. Софтуерът му осигурява:

- многоканални наблюдения (оптични, UV, радио);
- автоматично разпознаване на преходни събития (включително потенциално опасни астероиди);
- координация на телескопи в различни часови зони за непрекъснато наблюдение [16].

Преходните събития в мониторинга на околоземното пространство се определят като краткосрочни или променящи се явления, като например:

- проблясъци по повърхността на обекти (напр. отражение на слънчевата светлина от въртящ се астероид);
- внезапна поява на нови обекти (отломки от сблъсък, некаталогизирани преди това астероиди);
- аномални промени в траекторията (резки маневри на спътници, гравитационни смущения).

Б. Изкуствен интелект и големи данни в мониторинга

Алгоритмите за машинно обучение [17] се използват за:

- Класифициране на обекти (отломки/астероид/сателит) въз основа на спектрални и орбитални характеристики.
- Прогнозиране на сблъсъци, като се вземат предвид орбиталните неопределености (методи на Монте Карло, модели на невронни мрежи).

Обработка на големи данни [18]:

- Агрегиране на информация от радари, лидари и телескопи в унифицирани облачни платформи (напр. Службата за космически отломки на ESA).
- Използване на графични бази данни за анализ на връзките между обекти и фрагменти след сблъсъци.

В. Моделиране и цифрови близнаци

Физически симулатори (напр. ADAM на НАСА) възпроизвеждат:

- Динамиката на облаците от отломки след фрагментация.
- Ефективността на методите за отстраняване (лазерна аблация, системи за свързване).
- Цифровите близнаци на астероидите помагат за тестване на стратегии за отклонение, като се вземат предвид съставът и структурата на обекта.

Модерни технологии

Разработването на технологии за наблюдение на околоземното пространство е фокусирано предимно върху повишаване на чувствителността на сензорите, разширяване на зоната за наблюдение и автоматизиране на откриването и проследяването на обекти [11].

Някои методи изискват уточняване на терминологията:

Аблация (от латинското ablatio, което означава „отстраняване“) е процесът на отстраняване на материя от повърхността на обект под въздействието на външни фактори (лазерно лъчение, атмосферно триене и др.). В контекста на космическите отломки и намаляването на астероидната опасност, тя се използва за промяна на орбитата на обект поради импулса, генериран от изпаряването на неговия материал. Ударник (от английската дума „impact“) е устройство, предназначено да се сблъска с обект (например астероид), за да прехвърли кинетична енергия и да промени траекторията му.

Заключение

Този преглед показва, че геокосмическият мониторинг на околоземното пространство и разработването на методи за защита от космически отломки и астероидни опасности представляват сложно научно и техническо предизвикателство, чието решение изисква интердисциплинарен подход и международно сътрудничество. Развитието на информационните технологии – от автоматизирани системи за управление на телескопи (ISON, MASTER) до анализи на големи данни, базирани на изкуствен интелект – се превръща в критичен фактор за подобряване на точността и скоростта на реагиране на космически заплахи. По-нататъшната интеграция на информационните технологии с хардуерни системи, включително квантови изчисления за ускоряване на орбиталните изчисления, ще определи конкурентоспособността на отбранителните системи през следващото десетилетие.

Анализът, проведен в тази статия, показва, че:

- Сегашното състояние на околоземното пространство се характеризира с постоянен растеж на популацията на космически отломки, което представлява нарастващи рискове за оперативните космически кораби. В същото време се увеличава скоростта на изстрелване на нови спътници, особено като част от големи съзвездия.
- Системите за мониторинг на космически отломки и астероидни опасности се развиват активно, но все още имат ограничения при откриването и каталогизирането на малки обекти. Пълнотата на каталогизирането на космически отломки с размери по-малки от 10 см в ниска орбита и по-малки от 1 м в геостационарна орбита остава недостатъчна.
- Приблизително 56% от потенциално опасните астероиди с размер над 140 м са открити, което оставя значителна несигурност при оценката на заплахата от астероиди. За обекти с размер под 100 м пълнотата на откриване е по-малка от 30%.
- Технологиите за активно смекчаване на опасността от астероиди са в етап на демонстрационна мисия и все още не са приложени в индустриален мащаб. Най-обещаващите технологии са контактното улавяне за големи обекти и безконтактните методи за множество удари върху малки фрагменти.
- Методите за смекчаване на опасността от астероиди са претърпели първата си успешна демонстрация, но изискват по-нататъшно развитие, за да се гарантира ефективност при различни сценарии на заплаха. Комбинираните подходи, включително кинетични, гравитационни и експлозивни удари, изглеждат най-обещаващи.
- Международното сътрудничество в областта на мониторинга и смекчаването на космическите заплахи се разширява, но остават значителни политически и организационни бариери. Международната правна рамка и механизмите за координация трябва да бъдат подобрени.
- Усъвършенстваните технологии за мониторинг и отбрана могат значително да подобрят ефективността на противодействието на космическите заплахи, но изискват значителни инвестиции и международно сътрудничество за своевременно разработване и внедряване.

Литература:

1. Мануйлов С. А. Космический мусор - угроза безопасности космических полетов / С. А. Мануйлов // Проблемы безопасности полетов. – 2021. – № 9. – С. 35–53.
2. Молотов И. Е. Проблемы оптического мониторинга космического мусора /, В. М. Агапов, А. И. Стрельцов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2020. – № 7. – С. 1–17.
3. Ипатов А. В. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства / А. В. Ипатов, Л. А. Ведешин, С. А. Герасютин // Земля и Вселенная. – 2024. – № 2(356). – С. 91–108.
4. Ваганов А. Г. Защита от астероидной опасности: возможные варианты / А. Г. Ваганов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 8. – С. 75–80.
5. Усовик И. В. Разработка системы мониторинга некаталогизируемого космичесого мусора / И. В. Усовик, А. А. Морозов // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 4. – С. 202–209.
6. Тесленко Е. С. Космический мусор как риск безопасности космической деятельности / Е. С. Тесленко // XXXVI Международные Плехановские чтения : Сборник статей участников конференции. В 4-х томах, Москва, 25–27 апреля 2023 года. – Москва: Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 2023. – С. 14–19.
7. Лошкарева Е. Важность развития Системы Контроля Космического Пространства России и Европы для борьбы с космическим мусором / Е. Лошкарева, Т. Б. Радченко // Секция "Актуальные проблемы социально-гуманитарного знания" : Сборник докладов в рамках Московской молодёжной научно-практической конференции, Москва, 21–23 апреля 2015 года / Ответственный редактор: Каллиопин А. К. – Москва: Издательство "Перо", 2015. – С. 62–71.
8. Сирый Р. С. Возможности применения орбитальных систем компьютерного зрения для мониторинга космического мусора / Р. С. Сирый, П. С. Баранов // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XX Конференция молодых учёных, Москва, 14–15 апреля 2023 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. – С. 139–150.
9. Палюх Б. В. Методика выбора способа обеспечения безопасности космического аппарата при возможном воздействии объектов космического мусора / Б. В. Палюх, В. К. Кемайкин, И. В. Кожухин // Мягкие измерения и вычисления. – 2018. – № 8(9). – С. 35–44.
10. Николаева, Е. А. Преодоление астероидной опасности. Методы противодействия астероидной опасности / Е. А. Николаева // 14-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2015" Тезисы, Москва, 16–20 ноября 2015 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 70–72.
11. Камысбаева С. М. Анализ влияния космического мусора на космические объекты / С. М. Камысбаева // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сборник статей по материалам CXLIV студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 05 декабря 2024 года. – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Сибирская академическая книга", 2024. – С. 73–77.
12. Кулагин В. П. Проблемы астероидной опасности. Современные технологии и способы решения /, А. Ф. Каперко, А. А. Ледков, Б. М. Шустов // Новые информационные технологии : Тезисы докладов XXI Международной студенческой школы-семинара, Судак, 20–27 мая 2013 года / МИЭМ НИУ ВШЭ. – Судак: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2013. – С. 38–40.
13. Орлов П. Ю. Космический мусор как угроза для освоения околоземного космического пространства / П. Ю. Орлов, А. В. Панкин // Конструкторское бюро. – 2017. – № 3. – С. 62–68.
14. Molotov, I. & Sun, R. & Zhang, Chen & Almeida, U. & Zakhvatkin, Mikhail & Titenko, V. & Streltsov, A. & Mokhnatkin, A. & Kokina, T. & Elenin, Leonid. (2019). Russian-Chinese Observations of Fragments of the Destruction of the Centaur Rocket Stage are the First Step to the Network of BRICS Observatories. 95-102. 10.21046/spacedebris2019-95-102.
15. Elenin, L.V., Molotov, I.E. Software for the Automated Control of Robotic Optical Observatories. J. Comput. Syst. Sci. Int. 59, 894–904 (2020). https://doi.org/10.1134/S1064230720040036.
16. Lipunov, V.M., Vladimirov, V.V., Gorbovskoi, E.S. et al. The Concept of a Multi-Functional Astronomy Complex and Dynamically Integrated Database Applied to Multi-Channel Observations with the MASTER Global Network. Astron. Rep. 63, 293–309 (2019). https://doi.org/10.1134/S1063772919040073.
17. Jharbade, P., & Dixit, M. (2022). Detecting Space Debris using Deep Learning Algorithms: A Survey. 883–890. https://doi.org/10.1109/ICIRCA54612.2022.9985622.
18. Erik Blasch, Mark Pugh, Carolyn Sheaff, Joe Raquepas, Peter Rocci, "Big data for space situation awareness," Proc. SPIE 10196, Sensors and Systems for Space Applications X, 1019607 (5 May 2017); https://doi.org/10.1117/12.2264684.

PHYSICAL AND ORBITAL CHARACTERISTICS OF OBJECTS CONSTITUTING "SPACE JUNK" BASED ON DATA FROM OPTICAL GROUND-BASED OBSERVATIONS

Ognian Ognianov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ognianov@acceco.com

Keywords: *space debris, optical observations, astrometry, photometry, geostationary orbit (GEO), Space Surveillance and Tracking (SST)*

Abstract: *Optical ground-based telescopes are the main source of information on space debris in high orbits, where radar sensitivity falls with the fourth power of range. This paper reviews which orbital and physical characteristics of debris objects can be derived from optical data. Astrometry yields orbits, orbit-plane evolution in the geostationary region and area-to-mass ratios from solar radiation pressure perturbations. Photometry yields statistical size estimates, while light curves reveal rotation periods and attitude states. Colour indices and reflectance spectra give information on surface materials and their ageing. The methods are illustrated with observations of geostationary satellites and with orbit computations. Limitations, including the size–albedo degeneracy and the large number of uncorrelated detections, are discussed together with the role of optical sensors in the European SST network.*

ФИЗИЧЕСКИ И ОРБИТАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОБЕКТИТЕ, СЪСТАВЛЯВАЩИ „КОСМИЧЕСКИЯ БОКЛУК", ПО ДАННИ ОТ ОПТИЧНИ НАЗЕМНИ НАБЛЮДЕНИЯ

Огнян Огнянов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ognianov@acceco.com

Ключови думи: *космически отломки, оптични наблюдения, астрометрия, фотометрия, геостационарна орбита (GEO), Космическо наблюдение и проследяване (SST)*

Резюме: *Оптичните наземни телескопи са основният източник на информация за космическите отломки във високи орбити, където чувствителността на радара пада с четвърта степен на обхвата. Тази статия разглежда кои орбитални и физически характеристики на обектите от отломки могат да бъдат извлечени от оптични данни. Астрометрията дава орбити, еволюция на орбитата-равнина в геостационарната област и съотношения площ-маса от смущения в налягането на слънчевата радиация. Фотометрията дава статистически оценки на размера, докато кривите на светлината разкриват периоди на въртене и състояния на положение. Цветните индекси и спектрите на отражение дават информация за повърхностните материали и тяхното стареене. Методите са илюстрирани с наблюдения на геостационарни спътници и с изчисления на орбити. Ограниченията, включително дегенерацията на размера и албедото и големият брой некорелирани засичания, са разгледани заедно с ролята на оптичните сензори в европейската мрежа на SST.*

1. Introduction

Space debris comprises all non-functional human-made objects in Earth orbit: defunct satellites, spent rocket bodies, mission-related objects and fragments from explosions and collisions. According to ESA, about 45,000 objects are regularly tracked by surveillance networks. Statistical models estimate about 54,000 objects larger than 10 cm, 1.2 million between 1 and 10 cm, and 140 million between 1 mm and 1 cm [11]. Kessler and Cour-Palais [1] showed that collisions can make such a population self-generating.

Radar dominates observations in low Earth orbit (LEO). Its echo power, however, decreases with the fourth power of range, whereas reflected sunlight decreases only with the square. Between 1,000 km and the geostationary orbit (GEO, about 36,000 km) the radar signal therefore drops by about six orders of magnitude, the optical signal by about three. Optical telescopes are thus the main tool for medium Earth orbit (MEO), geostationary transfer orbit (GTO), Molniya orbits and GEO [2].

This paper reviews which orbital and physical characteristics of debris can be derived from optical ground-based observations, and illustrates them with our own images and orbit computations.

2. Optical observations and data processing

2.1. Observing geometry. An object can be observed only when it is illuminated by the Sun while the observer is in darkness. For LEO this restricts observations to twilight; GEO objects are visible most of the night, except near the equinoxes, when they cross the Earth's shadow around local midnight. In long exposures, satellites appear as trails among the stars (Fig. 1).



Fig. 1. Milky Way with the trails of two aircraft and three satellites in a single exposure (photo: O. Ognianov)

2.2. Sensors. Representative optical facilities are ESA's 1 m Optical Ground Station (Space Debris Telescope) on Tenerife, the 0.61 m MODEST Schmidt telescope at Cerro Tololo [4], NASA's 1.3 m ES-MCAT on Ascension Island and the ISON network of small telescopes [5]. In Europe, the optical sensors complement a mostly radar-based network: GRAVES, TIRA, GESTRA, BIRALES and the EISCAT radars on the radar side; the Tenerife telescope, ZimLAT and ZimSMART in Zimmerwald and Starbrook on Cyprus on the optical side (Fig. 2). Meter-class telescopes reach magnitude 18–20, which corresponds to objects of about 10–25 cm in GEO (Section 4.1).

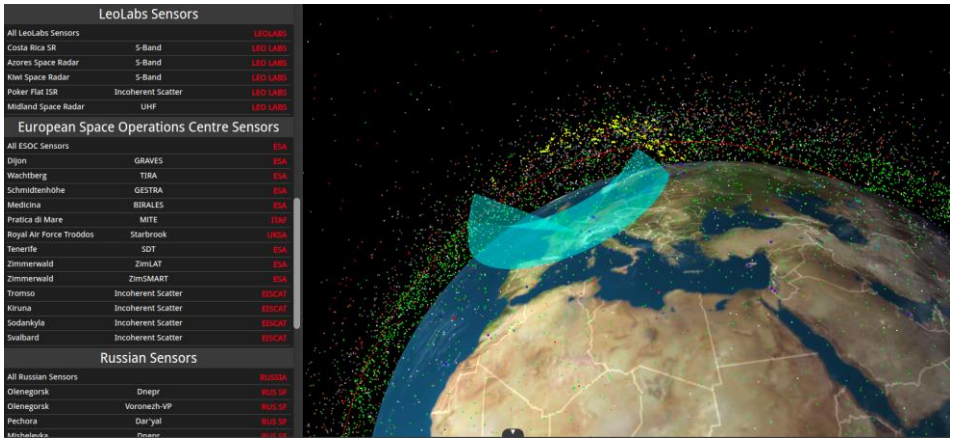


Fig. 2. European space observation centres and their sensors,
with the tracked population and a radar field of view over Europe (image: O. Ognianov)

2.3. Own observations. [Observing site(s), telescope aperture and focal length, camera, field of view, exposure times, observation period, number of frames and detected objects.]

2.4. Processing chain. The reduction of each night follows five steps:

1. Acquisition of CCD/CMOS frames in survey or follow-up mode.
1. Detection of streaks and point sources.
2. Astrometry: right ascension and declination of each object against reference stars (e.g. the Gaia catalogue).
3. Orbit determination: an initial orbit from a short arc, refined by a least-squares fit over several nights.
4. Correlation with the catalogue; an object without a match is classified as an uncorrelated target (UCT).

Fig. 3 shows a frame of the geostationary belt in which the satellites appear as short streaks. The objects were identified by comparing their measured positions with positions computed from catalogue orbits (Fig. 4).



Fig. 3. GEO satellites Express-AM7, Hellas Sat 2, Hellas Sat 3, PakSat-1R, Athena-Fidus and GOES 3 (image: O. Ognianov)

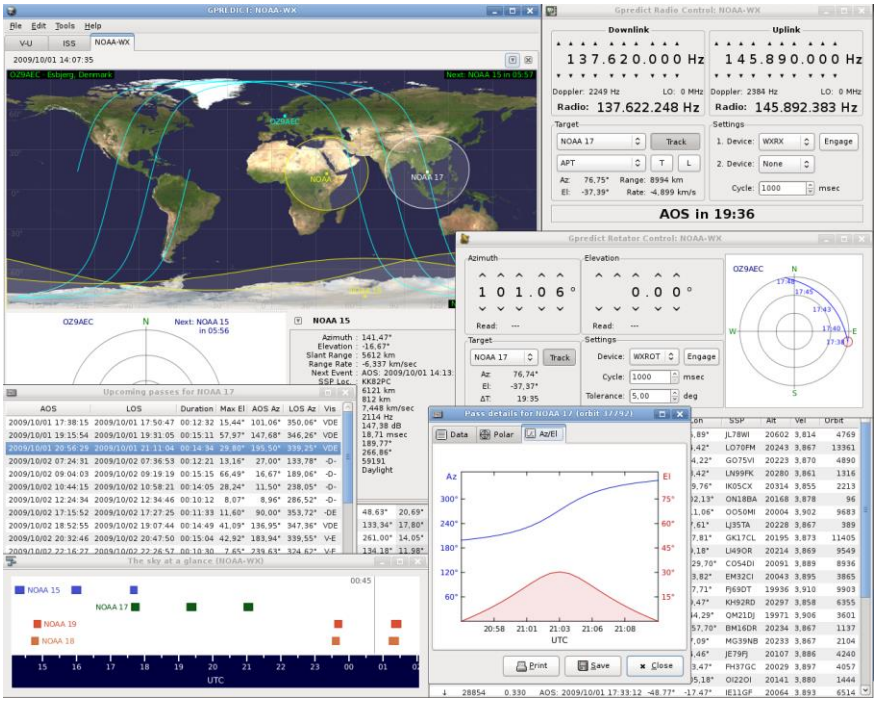


Fig. 4. Visualisation of calculated orbits: ground tracks, pass predictions and azimuth–elevation profiles in Gpredict (image: O. Ognianov)

3. Orbital characteristics

3.1. Distribution by orbital regime. The catalogued population forms a dense cloud in LEO and a distinct ring at geostationary altitude (Fig. 5). Optical surveys of the GEO ring show that a large share of faint detections cannot be correlated with any catalogued object [2, 3]; these uncorrelated targets are mostly small debris.

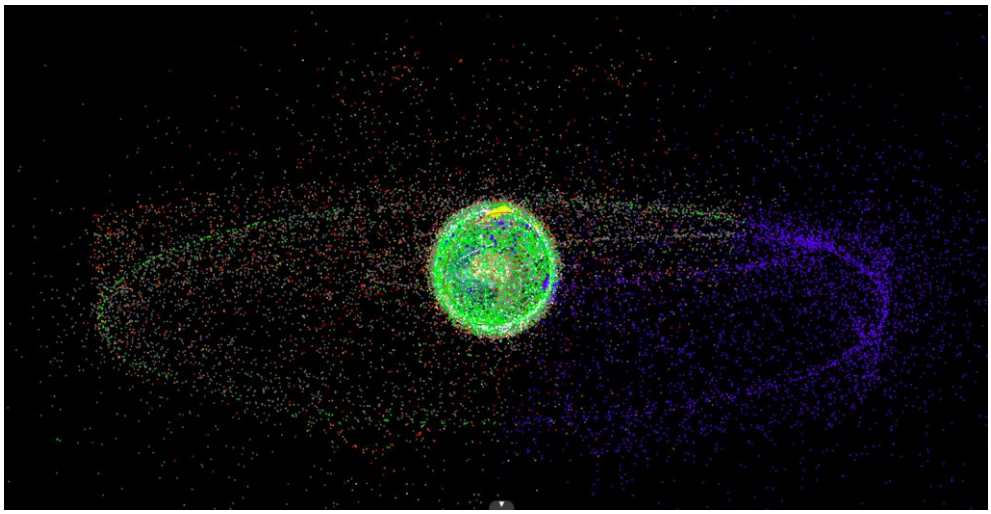


Fig. 5. Objects in Earth orbit: the dense LEO cloud and the GEO ring (image: O. Ognianov)

3.2. Orbit-plane evolution in GEO. Uncontrolled GEO objects are perturbed by the Sun, the Moon and the Earth's oblateness. Their orbital plane precesses around the Laplace plane, tilted by about 7.4° to the equator, with a period of about 53 years; the inclination oscillates between 0° and about 15° [2]. In the inclination-vector plane ($i\cdot\cos\Omega$, $i\cdot\sin\Omega$) these objects lie on a circle, which separates them clearly from station-kept satellites near the origin. In longitude, they either drift freely or librate around the stable points at 75° E and 105° W.

3.3. High area-to-mass-ratio objects. Surveys with the ESA telescope on Tenerife revealed faint objects in GEO-like orbits whose eccentricity changes quickly [3]. Their orbits can be fitted only with area-to-mass ratios (A/m) from about 1 to tens of m²/kg, compared with about 0.01–0.02 m²/kg for an intact satellite. They are most likely thin sheets such as multi-layer insulation. Solar radiation pressure drives a yearly oscillation of the eccentricity whose amplitude grows with A/m [6]; in a first-order model, the maximum eccentricity is about 0.03 per 1 m²/kg. Because their orbits change so fast, these objects are easily lost from the catalogue.

4. Physical characteristics

4.1. Size from brightness. For a diffusely reflecting (Lambertian) sphere of diameter d, albedo p and range R, the apparent magnitude is:

$$m = m_{\odot} \quad 2.5\log_{10}\left[\frac{2}{3}\,p\left(\frac{d}{2}\right)^{2}\frac{F(\varphi)}{R^{2}}\right],$$

where $m_{\odot} = -26.74$ is the magnitude of the Sun and $F(\varphi)$ is the phase function, normalised to $F(0) = 1$. Since the albedo of an individual object is unknown, a standard value $p = 0.175$ is commonly adopted [7]. Table 1 gives the resulting diameters in GEO.

Table 1. Diameter versus magnitude in GEO (R = 35,786 km, p = 0.175, φ = 0°)

Magnitude	Diameter (m)
14	1.5
16	0.6
18	0.24
20	0.09

An albedo anywhere between 0.05 and 0.4 changes the derived size by a factor of about 2.8, so sizes are meaningful statistically rather than for individual objects.

4.2. Rotation and attitude from light curves. Light curves show three main behaviours: a flat curve (stable or very slowly rotating objects), periodic variation with specular glints from flat surfaces such as solar panels, and aperiodic tumbling, typical of fragments [9]. The measured period is the apparent (synodic) period, which differs slightly from the sidereal spin period. Spin rates of defunct satellites change over years; Envisat, for example, rotated with a period of about two minutes in 2013, slowly lengthening [8].

4.3. Materials from colours and spectra. Colour indices (B–V, V–R, R–I) can be measured for faint objects, while reflectance spectra require brighter targets but show material features, such as the aluminium absorption near 830 nm [10]. Space weathering reddens and darkens surfaces over time, so spectra of old debris cannot be compared directly with laboratory spectra of fresh materials. The aim is to link material to origin, for example to distinguish multi-layer insulation fragments from paint flakes.

5. Discussion and conclusions

Optical ground-based observations provide the orbital picture of the debris population in MEO, GTO and GEO, together with physical properties that radar cannot easily obtain at these distances: area-to-mass ratios, statistical sizes, spin states and surface materials.

The main limitations are observing conditions (weather, Moon, night-time only), the degeneracy between size and albedo, and the large number of faint uncorrelated targets that are detected once and then lost. Satellite trails from large constellations increasingly contaminate survey images.

Future progress is expected from larger automated survey networks, machine-learning detection of streaks and combination with laser ranging and radar. These data calibrate debris environment models such as ESA MASTER and NASA ORDEM and support active debris removal missions, which need the spin state of a target before capture. Observers in Bulgaria can contribute to the European SST network through coordinated campaigns [12].

Acknowledgements

"Preparatory activities to join SSA program of ESA" (PASSA), Yavor Shopov, Penka Maglova, Alexey Stoev

References:

1. Kessler, D.J., Cour-Palais, B.G. (1978). Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt. J. Geophys. Res., 83(A6), 2637–2646.
6. Schildknecht, T. (2007). Optical surveys for space debris. Astron. Astrophys. Rev., 14, 41–111.
7. Schildknecht, T., et al. (2004). Optical observations of space debris in GEO and in highly-eccentric orbits. Adv. Space Res., 34, 901–911.
8. Seitzer, P., et al. (2004). MODEST observations of space debris at geosynchronous orbit. Adv. Space Res., 34, 1143–1149.
9. Molotov, I., et al. (2008). International scientific optical network for space debris research. Adv. Space Res., 41, 1022–1028.
10. Liou, J.-C., Weaver, J.K. (2005). Orbital dynamics of high area-to-mass ratio debris and their distribution in the geosynchronous region. Proc. 4th European Conference on Space Debris, ESA SP-587.
11. Mulrooney, M.K., Matney, M.J. (2007). Derivation and application of a global albedo yielding an optical brightness to physical size transformation free of systematic errors. Proc. AMOS Technical Conference.
12. Kucharski, D., et al. (2014). Attitude and spin period of space debris Envisat measured by satellite laser ranging. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 52(12), 7651–7657.
13. Šilha, J., et al. (2018). Apparent rotation properties of space debris extracted from photometric measurements. Adv. Space Res., 61, 844–861.
14. Vananti, A., Schildknecht, T., Krag, H. (2017). Reflectance spectroscopy characterization of space debris. Adv. Space Res., 59, 2488–2500.
15. ESA Space Debris Office (2025). ESA's Space Environment Report 2025; Space Environment Statistics, sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics (accessed October 2026).
16. Ognyanov, O., Shopov, Y., Maglova, P., Stoev, A. Astrometry of artificial satellites based on cooperative observation campaigns. SES 2019.

КОСМИЧЕСКА РАДИАЦИЯ И КОГНИТИВНИ ФУНКЦИИ

Александър Кузев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: alekskuzef@abv.bg

Ключови думи: *Космическата радиация, централна нервна система, когнитивни способности*

Резюме: *Космическата радиация е един от основните биологични рискове при продължителни мисии извън защитата на земната магнитосфера. Галактическата космическа радиация съдържа високоенергийни частици, включително тежки йони, които могат да проникнат през защитата на космическия кораб и да достигнат до човешките тъкани. Особено тревожен е потенциалният ефект върху централната нервна система, тъй като когнитивните способности са от решаващо значение за безопасното изпълнение на космическа мисия.*

При пътувания до Марс например астронавтите ще бъдат изложени на радиация в продължение на месеци. През този период те ще трябва да поддържат висока концентрация, да запомнят информация, да се ориентират в пространството, да изпълняват сложни процедури и да вземат решения при непредвидени ситуации. Затова учените изследват дали космическата радиация може да промени работата на мозъка и дали тези промени могат да останат дълго след самото облъчване.

COSMIC RADIATION AND COGNITIVE FUNCTIONS

Aleksandar Kuzev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: alekskuzef@abv.bg

Keywords: *Cosmic radiation, central nervous system, cognitive abilities*

Abstract: *Cosmic radiation is one of the major biological risks associated with long-duration missions beyond the protection of Earth's magnetosphere. Galactic cosmic radiation consists of high-energy particles, including heavy ions, that can penetrate spacecraft shielding and reach human body. Of particular concern are the potential effects on the central nervous system, as cognitive abilities are essential for the safe execution of space missions.*

During missions to Mars, for example, astronauts will be exposed to radiation for several months. Throughout this period, they will need to maintain a high level of concentration, retain information, navigate in space, perform complex procedures, and make decisions in extreme conditions. Therefore, scientists are investigating whether cosmic radiation can alter brain functions and whether such changes may persist long after radiation exposure has ended.

Въведение

Трайни когнитивни нарушения.

Едно от важните експериментални изследвания на влиянието на космическата радиация върху мозъка е проведено с животински модели. Целта на учените е да установят дали излагането на високо енергийни частици може да доведе до трайни нарушения в обучението и паметта [1].

Животните са подложени на различни поведенчески тестове, чрез които се изследват отделни компоненти на когнитивните функции. Изследователите проверяват способността на животните да разпознават нови обекти, да запомнят местоположението на обекти, да различават реда на събитията и да променят поведението си, когато правилата на задачата се променят [1].

Това е особено важно, защото човешката когнитивна дейност не се състои само от „памет“. За да изпълни сложна задача, мозъкът трябва едновременно да приема информация, да я запомня, да определя кое е важно, да променя стратегията си и да реагира адекватно на нови условия [1].

Резултатите от експеримента показват, че радиационното въздействие може да доведе до нарушения в няколко различни области на когнитивното функциониране. Наблюдавани са проблеми при разпознаването на обекти, пространствената памет и паметта за времевия ред. Изследването показва също, че част от тези нарушения могат да бъдат устойчиви и да се наблюдават дълго след първоначалното облъчване [1].

Памет и хипокамп

По-ново изследване използва по-сложна симулация на галактическата космическа радиация, състояща се от 33 различни радиационни компонента. Този подход е предназначен да се доближи повече до сложния спектър на радиацията, с която би могъл да се сблъска организмът при продължително пътуване в дълбокия космос [2].

В експеримента са изследвани мъжки и женски мишки, изложени на остра или хронична радиация. Учените не се ограничават само до поведенчески тестове. Те изследват и функционирането на нервните клетки в хипокампа – мозъчна структура, която играе ключова роля във формирането на паметта и пространственото учене [2].

При животните е изследвана способността да запомнят промени в местоположението на обекти. Това позволява да се оцени т.нар. хипокампално-зависима памет. Проведен е и тест за разпознаване на нов обект, чрез който се проверява дали животното разпознава информация, с която вече се е сблъсквало.

Резултатите показват, че ефектите на космическата радиация могат да бъдат различни при мъжки и женски животни. При женските мишки се установяват устойчиви нарушения във формирането и реконсолидирането на хипокампално-зависимата памет. При мъжките мишки по-ясно се наблюдава нарушение в разпознаването на нови обекти.

Това означава, че една и съща радиационна експозиция не задължително предизвиква абсолютно еднакъв когнитивен отговор при различните организми.

Когато радиацията променя самите връзки между невроните

Изследването не спира до поведението на животните. Учените изследват как функционират нервните клетки в CA1 областта на хипокампа.

Един от използваните показатели е дългосрочната потенциация – LTP. Тя представлява продължително увеличаване на ефективността на синаптичната комуникация между нервните клетки и е един от основните експериментални модели за изучаване на процесите, свързани с ученето и паметта.

След радиационното въздействие е установено значително намаляване на LTP в хипокампа и при двата пола. Това е важно, защото показва, че радиацията не просто кара животното да се представя по-зле на даден тест. Тя може да промени начина, по който нервните мрежи се адаптират и комуникират.

Изследователите установяват и промени в синаптичните структури, включително в постсинаптичните области на нервните клетки. Наблюдавани са и промени в миелинизацията на нервните влакна.

Така резултатите сочат към многостранно въздействие върху мозъка – поведенчески промени, промени в паметта, нарушения на синаптичната пластичност и структурни промени в нервната тъкан.

Неврогенеза – може ли мозъкът да се възстанови?

Това изследване добавя много интересен въпрос към темата: Какво се случва с мозъка месеци и дори години след радиационното въздействие?

Учените използват мъжки и женски мишки, които са изложени на ^56Fe йони – тежки високоенергийни частици, използвани като модел на компоненти на галактическата космическа радиация. Животните получават различни дози, а мозъчните и поведенческите промени са проследявани в продължение на много месеци.

Особено внимание е отделено на хипокампа. Изследователите анализират неврогенезата, синаптичната пластичност и пространственото учене.

Два месеца след облъчването се наблюдава потискане на образуването на нови нервни клетки в хипокампа. Наред с това се установяват нарушения в синаптичната пластичност и пространственото учене.

Но след шестия месец картината започва да се променя. Дефицитите в пространственото учене вече не се наблюдават по същия начин, а синаптичната потенциация започва да се увеличава. На 12-ия месец е установено значително увеличаване на новообразуваните нервни клетки.

Това е един от най-интересните резултати в изследването, защото предполага, че мозъкът може да активира компенсаторни или възстановителни механизми след първоначалното радиационно увреждане [4].

Мозъкът не се предава лесно

Особено впечатляващото в това изследване е, че ефектът на радиацията не се развива по права линия. Първоначално се наблюдава увреждане, но с течение на времето нервната система показва признаци на адаптация.

Два месеца след радиационното въздействие броят на новообразуваните нервни клетки е намален. Дванадесет месеца по-късно обаче броят им се увеличава значително над нивата на контролните животни. Подобна времева динамика се наблюдава и при синаптичната пластичност и пространственото учене.

Това предполага, че мозъкът може да реагира на първоначалното увреждане чрез активиране на механизми, които се опитват да възстановят или компенсират нарушената функция.

Авторите предполагат, че тези компенсаторни процеси могат да продължат много дълго след първоначалното радиационно въздействие. По този начин еднократната експозиция може да има влияние върху пластичността и когнитивните функции за много продължителен период.

Пространствено учене

Пространственото учене е особено важна когнитивна функция, защото позволява на организма да създава представи за местоположението на обектите и за отношенията между тях. То е тясно свързано с функцията на хипокампа.

В експериментите с мишки учените установяват, че радиационното въздействие може първоначално да наруши пространственото учене. Животните, изложени на ^56Fe частици, показват по-слабо представяне в задачите, които изискват запомняне и използване на пространствена информация.

Интересното е, че тези нарушения не се запазват непроменени през целия период на наблюдение. При по-късните измервания се установява подобряване на пространственото представяне, което съвпада с промени в синаптичната пластичност и увеличаване на броя на новообразуваните нервни клетки.

Това подкрепя идеята, че когнитивните последствия от космическата радиация могат да бъдат динамични. Мозъкът може първоначално да бъде увреден, но след това да започне процес на функционална компенсация.

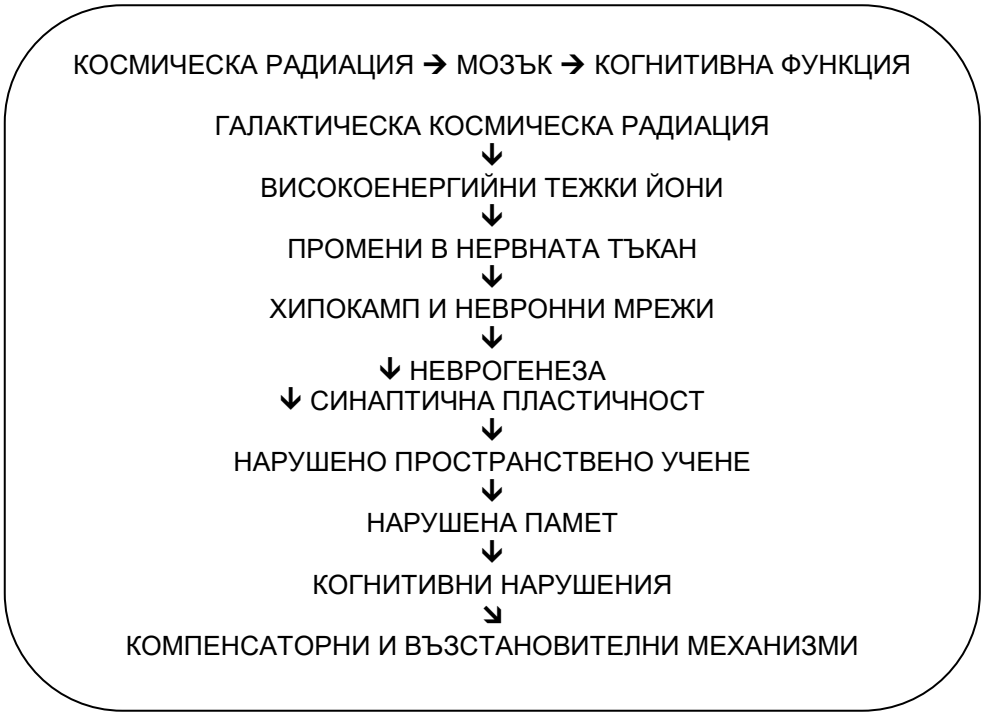
Трите изследвания – една обща картина

Когато резултатите от трите изследвания се разглеждат заедно, се очертава сложна връзка между космическата радиация и когнитивните функции.

Първото изследване показва, че радиационното въздействие може да доведе до продължителни нарушения в различни видове памет и когнитивна гъвкавост. Второто показва, че по-реалистичната симулация на галактическата космическа радиация може да засегне хипокампално-зависимата памет и синаптичната пластичност. Третото показва, че след първоначалното увреждане мозъкът може да активира дългосрочни компенсаторни механизми.

Следователно въздействието на космическата радиация върху когнитивните функции не трябва да се разглежда само като еднократно „увреждане на мозъка“. То представлява динамичен процес, при който могат да се наблюдават увреждане, функционални промени, адаптация и компенсация.

Тези резултати са особено важни за бъдещите мисии до Марс и други дестинации в дълбокия космос. Необходимо е да се разбере не само как радиацията увреждa нервната система, но и как мозъкът се опитва да се справи с това увреждане.



Фиг. 1. Трите изследвания – една обща картина

Резултатите показват (Фиг. 1), че радиацията може да въздейства върху мозъка на няколко нива – да промени поведението и паметта, да отслаби връзките между невроните и да предизвика структурни изменения в нервната тъкан.

Освен върху поведението и паметта, радиацията може да окаже влияние и върху самите нервни клетки в мозъка, по-специално в областта CA1 на хипокампа, която има важна роля за ученето и запаметяването.

Учените установяват, че след излагане на радиация значително намалява дългосрочната потенциация (LTP). Това е процес, при който връзките между нервните клетки стават по-силни и по-ефективни. Той е изключително важен за формирането и съхраняването на спомени.

Намаляването на LTP показва, че радиацията не просто влошава представянето на животните при тестове, а може да наруши и начина, по който нервните клетки общуват и изграждат връзки помежду си. Този ефект е наблюдаван както при мъжките, така и при женските животни.

Освен това са открити промени в структурата на синапсите, чрез които невроните обменят информация, както и в миелиновата обвивка на нервните влакна, която подпомага предаването на нервните сигнали.

Защо това е важно за астронавтите?

При бъдещи мисии до Марс астронавтите ще трябва да функционират в среда, в която земната магнитосфера вече няма да осигурява същата степен на защита от космическата радиация.

Когнитивната функция ще бъде критична за успеха на мисията. Астронавтите ще трябва да запомнят сложни процедури, да обработват информация, да поддържат внимание за продължителни периоди, да се ориентират в пространството, да променят стратегията си при неочаквани ситуации и да вземат решения в условия на стрес и ограничени ресурси.

Затова дори умерено нарушение на паметта, вниманието или когнитивната гъвкавост би могло да има значение за безопасността на екипажа.

Животинските експерименти не доказват, че хората ще развият същите нарушения. Те обаче предоставят възможност за изследване на механизмите, които могат да стоят зад подобни ефекти, и за разработване на бъдещи стратегии за защита на мозъка.

Заключение

Космическата радиация представлява сериозно предизвикателство за бъдещите дългосрочни космически мисии. Експериментите върху мишки показват, че високоенергийните частици могат да повлияят на различни когнитивни функции, включително паметта, ученето и пространствената ориентация.

Изследванията показват, че радиационното въздействие може да промени функцията на хипокампа, да потисне неврогенезата и да наруши синаптичната пластичност. Тези промени могат да бъдат свързани с нарушения в ученето и паметта.

В същото време мозъкът демонстрира забележителна способност за адаптация. Част от промените могат да бъдат последвани от компенсаторни процеси, които продължават месеци и дори години след радиационното въздействие.

Разбирането на взаимодействието между космическата радиация и мозъка е ключово за защитата на когнитивните функции и безопасността на бъдещите астронавти.

Литература:

1. Parihar et al., 2016, Cosmic Radiation Exposure and Persistent Cognitive Dysfunction.
2. Alaghband et al., 2023, Galactic Cosmic Radiation Exposure Causes Multifaceted Neurocognitive Impairments.
3. Omid Miry, Xiao lei Zhang, Linnea R. Vose, et al., Life-long brain compensatory responses to galactic cosmic radiation exposure. Scientific Reports | (2021) 11:4292 | https://doi.org/10.1038/s41598-021-83447-y
4. Miry et al., 2021, Life-long Brain Compensatory Responses to Galactic Cosmic Radiation Exposure.

eHEALTH WEARABLES DETECTING COGNITIVE IMPAIRMENT: META-ANALYSIS

Malina Jordanova[1], Todor Uzunov[2], Frank Lievens[3], Alexander Kuzev[1]

[1]*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria*
[2]*Tucek zentrum für psychiatrische und rechtspsychologische begutachtung, Germany*
[3]*Managing Director of LIEVENS-LANCKMAN BVBA, Belgium & AKROMED, France*
e-mail: telepsychology@gmail.com

Keywords: *eHealth, wearables, cognitive impairment*

Abstract: *eHealth wearables offer significant value in the detection and monitoring of cognitive impairment by shifting from episodic clinical check-ups to continuous, passive, real-world tracking.*

This paper presents a brief review and meta-analysis of eHealth wearables application for the detection of cognitive impairments.

ЕЛЕКТРОННО ЗДРАВЕОПАЗВАНЕ: НОСЕНИ ВЪРХУ ТЯЛОТО УСТРОЙСТВА ЗА ОТКРИВАНЕ НА КОГНИТИВНИ НАРУШЕНИЯ: МЕТА АНАЛИЗ

Малина Йорданова[1], Тодор Узунов[2], Франк Ливенс[3], Александър Кузев[1]

[1]*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките, България*
[2]*„Тучек“ Център за психиатрична и съдебно-психологическа експертиза, Германия*
[3]*Изпълнителният Директор, LIEVENS-LANCKMAN BVBA, Белгия & AKROMED, Франция*
e-mail: telepsychology@gmail.com

Ключови думи: *Електронно здравеопазване, устройства, носени на тялото, когнитивни нарушения*

Резюме: *Носените върху тялото електронни устройства могат да са от изключителна полза при откриването и проследяването на когнитивни нарушения. Те са в състояние да променят подхода от епизодични клинични прегледи към непрекъснато наблюдение в реална среда.*

В настоящата статия са представени кратък обзор и мета-анализ на приложението на подобни устройства за регистрирането на когнитивни нарушения.

Introduction

eHealth wearables

eHealth wearables are electronic devices worn on the body. Well-known examples of eHealth wearables are smartwatches, rings, patches and smart textiles. The purpose of wearing them is the continuous track of vital signs to support building a healthy lifestyle, remote patient monitoring, chronic disease management and preventive healthcare.

The most common types of wearable devices used to enhance subjects / patients' outcomes and well-being are:

- Smartwatches and fitness trackers monitoring heart rate, activity levels, sleep patterns;
- Continuous glucose monitors that track blood sugar levels in real time for diabetics;
- Wearable Electrocardiogram (ECG) and blood pressure monitoring devices;
- Wearable sleep trackers;
- Smart clothing and biosensors tracking muscle activity, posture, movements;
- Wearable neuro devices monitoring brain activity;
- Fall detection devices and
- Wearable respiratory monitors.

Wearable health technology market, including smart clothing, is forecast at $175 billion in 2026, on track toward $383.5 billion by 2032. Medical smartwatches and the clinical wearable market are the fastest-growing segment of wearable tech market, expanding at roughly 25% annually.

eHealth wearables may offer significant value in the detection and monitoring of cognitive impairment by shifting from episodic clinical check-ups to continuous, passive, real-world tracking.

Cognitive impairment

Cognitive impairment is an inclusive term describing any characteristic that acts as a barrier to the cognition process or different areas of cognition.

Key facts characterizing cognitive impairment are:

- Problems remembering things, problems with concentration and/or making decisions and solving problems;
- Changes in behavior, difficulty controlling emotions and trouble communicating with others.

Cognitive impairment is not an illness but it can be a sign for other health conditions. Roughly, cognitive impairment has three level of severity:

- Mild cognitive impairment, i.e. minor changes in memory or thinking that are noticeable, but do not stop a person from living independently;
- Major Neurocognitive Disorder (Dementia), i.e. severe decline in multiple cognitive areas that interferes with daily tasks and independence and
- Delirium – a sudden, short-lived change in attention and consciousness that often fluctuates throughout the day.

Causes of cognitive impairment include dementia, depression, delirium, head injury or stroke.

According to WHO, primary risk factors for development of cognitive impairments are advancing age; lower educational attainment; depression status and psychological distress; vascular and cardiovascular conditions (such as high blood pressure and history of stroke), low physical activity and low socioeconomic status.

The global prevalence of mild cognitive impairment (MCI) among older adults is estimated at 23.7% according to recent meta-analyses, though rates vary from roughly 12% to over 25% depending on age, region, and whether individuals live in community or institutional settings. Approximately 10% to 15% of people with MCI progress to a dementia diagnosis each year, with about one-third developing Alzheimer's-related dementia within five years. According to WHO, the number of people with dementia is set to triple by 2050 world-wide.

eHealth Wearables Detecting Cognitive Impairment

Early detection is critical for slowing the decline of cognitive function and lowering the risk of dementia.

Current methods to monitor cognitive decline involve being assessed at a doctor’s office. Such evaluations are very helpful but they can only capture a moment in time and, depending on the socio-economic status of the individual, may not be regularly available.

As wearable technology becomes more widespread, it has become a useful tool for tracking various health statistics that could help pick up on deviation or decline in an individual’s typical performance.

Applying eHealth wearables, early and mild cognitive impairments are studied by tracking digital biomarkers such as heart rate, EEG, sleep cycles, physical activity during everyday life and match the results with lifestyle factors (stress, diet, exercise …) in reality.

The Goal

The goal of this paper is to present, in brief, the results from a review and meta-analysis trying to identify if there is an effect of application of eHealth wearables for detection of mild cognitive impairment.

Method

A systematic search was performed to identify the relevant studies.

The following databases were used: APA PsychNet, PubMed, IEEE and Google Scholar. These databases were selected as:

APA PsychNet is the world's largest resource devoted to peer-reviewed literature in behavioral science and mental health.

PubMed contains more than 40 million citations and abstracts of biomedical and life sciences literature dating back to 1946. As it does not always provides direct full-text articles, though it often includes links to free or subscriber-based full-text versions on publisher sites, Google Scholar database is used as a source for free online full text articles, if and when available.

IEEE focuses on electrical engineering, electronics, computer science, telecommunications, artificial intelligence, and allied technological fields thus, eHealth wearables applications are also included in it.

The search period was from January 1st, 2022 – October 1st, 2026.

To make the selection as broad as possible and not to miss any publications, the key words were “eHealth wearable/s” “Cognitive impairment/s”.

Included criteria were:

- The research is focused on both “eHealth wearable/s” “Cognitive impairment/s”;
- The research is published in a journal and for the first time;
- The paper is a systematic review;
- The research is published in English;
- The subjects / patients are adults;
- The research introduces or discussed “eHealth wearable/s” related to “Cognitive impairment/s”;
- The research is an original one and the full text is available in one or another database.

Studies that did not meet one or more of the above criteria were excluded from the review.

Microsoft Excel template was created, helping to extract the information needed for the analysis: list of authors, country of research, methodology used; information about subjects included in the study (age, gender, ethnicity), description of findings, impact statements.

To synthesize and describe the data, the narrative approach was applied.

Results and Discussion

The first step of the selection was to extract all systematic reviews that were available in “full text” and include “eHealth wearable/s” related to “Cognitive impairment/s”; anywhere in the text, excluding the references.

45 papers were identified.

The next step was to add, “first posting” to exclude papers that were updated versions of studies performed before. In addition, a checking to evaluate whether the index terms are both “eHealth wearable/s” related to “Cognitive impairment/s” was performed. The index terms are the terms that captures the essence of the topic of a document. All articles that do not meet these criteria were rejected.

Titles and abstracts, then full text screening were carried out to assess the article eligibility against the inclusion criteria. Any arising disagreements were resolved by discussion.

Three more papers were excluded as the focus was on AI and machine learning. From original 45 publications only 15 were included in the analysis [1–15].

Due to the limited space of the paper, a summary of the results is presented.

Description of Included Studies

The included studies were published from 12 countries most of them European (Greece, Denmark, France, Italy, Luxembourg, UK, Spain, Saudi Arabia, Canada, USA, India, China).

Recruited participants vary from 5 up to 3019.

Ethnicity and/or the cultural background of participants were not reported in all studies. Most of the participants were identified as white.

Wide range of methods to monitor cognitive and physiological functions are used:

- Movement and gait devices follow and record walking speed, balance, dual-task performance, etc. [1, 3, 6, 7, 11].
- Sleep pattern and circadian rhythm are studied in [1, 5, 8, 10, 13].
- Brain activity, i.e. electroencephalogram (EEG), is documented via wireless sensors during task execution or daily activities [5, 12, 14];
- Speech analysis tools use specialized acoustic, inertial, and physiological sensors to track, decode, or analyze vocal patterns, vocabulary richness, pronunciation, throat vibrations, etc [11].
- Blood pressure [4], posture sensors [13] and home monitoring devices [9] are also used.

Results

Before summarizing the results, it is necessary to underline that most of the studies come from high-income Western countries, i.e. some of the results may not be exactly applicable to low-income communities. This is essential, as the socioeconomic status is one of the preliminary risks of development of cognitive impairments. Low socioeconomic status defined by income, education, and occupation is a major risk factor for cognitive impairment and dementia [16].

All analyzed studies underlined that eHealth wearable devices provide continuous, passive, and objective monitoring of behavioral and physiological biomarkers. Thus, they offer a critical shift toward detecting mild cognitive impairment and dementia long before traditional clinical symptoms become apparent.

All studies also agreed that wearable technology presents a promising opportunity to enhance the care for people with mild cognitive impairments by providing continuous health monitoring, real-time alerts, and improved patient autonomy. Devices as ear-based hearing aids, smart earphones or movement and gait sensors have the potential for tracking physiological parameters and support early interventions.

Devices measuring walking speed, stride length, balance, and dual-task performance capture the distinct "motor signature" often tied to cognitive impairment long before they become apparent [1, 3, 6, 7, 9, 11, 13].

Speech analysis tools, are especially useful to figure mild cognitive impairments and early signs of Alzheimer's disease [11]. Applied either in the background during phone calls or through specific voice recording exercises, they record word-finding difficulties and planning delays, reduced overall syllables-per-second or extended articulation times reflecting general processing slowdown.

Studies that monitor sleep pattern link fragmented sleep, altered sleep architecture, and irregular circadian rhythms to early cognitive decline and Alzheimer’s disease [1, 5, 8, 10, 13].

Wearable electroencephalography or direct neurophysiological measurements register real-time brainwave frequencies (alpha, beta, theta waves), serving as non-invasive indicators of cognitive load and neural irregularities. Finding such as a shift toward lower-frequency power (increased delta and theta waves) paired with a drop in higher-frequency power (decreased beta and alpha waves), shorter average duration and an increased number of ultrashort EEG microstates, etc. may forecast or even track mild cognitive impairment and/or beginning of neurodegenerative diseases [5, 12, 14].

Most studies offer potential clues where monitoring strategies might be tailored to the individual patient under the tenets of P4 medicine (predict, prevent, personalize and participate).

Most of the studies also agree that eHealth wearables are easy to apply to elderly or patients by relatives, caregivers or the person that has to be monitor. Yet, it is also underlined that now existing solutions are not always user-friendly and ergonomic for the elderly.

The analysis also highlights:

- Substantial heterogeneity among wearable devices currently used for detection of cognitive impairment –mobile phones, smart watches and/or bracelets; incontinence pad sensors, wireless in-ear EEG wearables, etc.…
- Extreme heterogeneity in recording protocols and lack of consensus for signal acquisition protocols, lack of possibility to integrate the results to the electronic health records of the patients.
- A serious problem caused by the complexity of neurophysiological biomarkers is the validation of the registrations and applied methodology, especially when the sample size is small.
- Unstable connectivity, digital inequality of elderly and patients, privacy risks and infrastructure limitations are also emphasized.

For the future, the development of a unified framework for the use of wearables for detection of mild cognitive impairment is necessary. In addition, more studies should focus on community-based recruitment to improve ecological validity and generalizability.

Another key focus for future is Artificial Intelligence (AI) integration, resp. machine learning. The latter enables the transmission and analysis of the data acquired by the device's sensors. Those studies that already applied AI, prove that machine learning and deep learning, offers new tools to uncover hidden signatures in complex biomedical data [2, 18-19].

The analysis also reveals the main challenges while applying eHealth wearables for detection of cognitive impairment as follows:

- Substantial methodological variability in the application of wearables;
- Lack of consensus for signal acquisition protocols;
- Data overload and alert fatigue, i.e. wearables generate massive daily data streams that can overwhelm both patients and caregivers;
- Accuracy and interoperability;
- Privacy and security issues.

Strengths and Limitations

The results of this meta-analysis contribute to the knowledge on evaluation and coping with cognitive impairment problems applying eHealth wearables. It brings us to lessons of digital health applications for mental health support that could be applied in the future.

The strengths of this meta-analysis are:

- The follow up PRISMA-ScR [17] guidelines;
- Selection of the most suitable databases;
- Selection of most recent studies, performed within different countries and continents, resp. ethnic groups.

However, this analysis has its limitations to list some:

- Only papers published in English were selected. This is something that the authors will correct in the next step of their research;
- Only studies published in the period 1.1.2023–1.10.2026 were chosen;
- There are missing data from some included studies, despite of the attempts to contact the corresponding authors;
- The search strategy was limited to studies where eHealth wearables and cognitive impairments were the index items. This may let us to overlook some important articles where eHealth wearables and cognitive impairments were not in the focus of the study.

Conclusions

The global aging population is rapidly increasing. Thus, the prevalence of age-related cognitive conditions, such as mild cognitive impairment, is becoming more common. Although this condition represents intermediate stages between normal aging and dementia, detecting cognitive decline earlier allows for more timely interventions and treatment plans, resulting in better medication effectiveness and lifestyle modification as lifestyle changes can help to prevent or slow the cognitive impairment.

All studies analyzed proved that eHealth wearables offer advantages over traditional assessment methods, i.e. frequency, objectivity, monitoring in natural setting.

No doubt, wearable intelligence enabled technology in cognitive impairment care will enable faster and safer preventive care, lower overall cost, improved patient-centered practice and enhanced sustainability.

References:

1. Cejudo, A., M. Arrojo, C. Martín and A. Almeida AI and Wearables for Early Detection of Cognitive Impairment and Dementia: Systematic Review. J Med Internet Res. Feb 23;28:e86262, 2026, doi: 10.2196/86262.
2. Alshammari, S., M. Alsubaie, M. Figeys, A. Ríos Rincón, V. Ezeugwu, S. Esmail, C. Daum, L. Liu and A. Miguel Cruz. Analyzing Mobility Indicators Using Machine Learning to Detect Mild Cognitive Impairment: A Systematic Scoping Review. Appl Clin Inform. Aug;16(4):974–987, 2025, doi: 10.1055/a-2657-8212.
3. Hamedani, M., S. Caneva, GL. Mancardi, PA. Alì, P. Fiaschi, F. Massa, A. Schenone and M. Pardini. Toward Quantitative Neurology: Sensors to Assess Motor Deficits in Dementia. J Alzheimers Dis. 101(4): 1083–1106, 2024, doi: 10.3233/JAD-240559. PMID: 39269840.
4. Littig, L., K. N. Sheth, A. M. Brickman, E. A. Mistry and A. de Havenon. Blood Pressure and Cognitive Function in Older Adults. Clin Geriatr Med. Nov; 40(4):597–613, 2024, doi: 10.1016/j.cger.2024.04.003.
5. Soulier, T., N. Burgos, R. Hassanaly, M. Pitombeira, M. Solal et al. Artificial intelligence in presymptomatic neurological diseases: Bridging normal variation and prodromal signatures. Rev Neurol (Paris), Nov;181(9):944–950, 2025, doi: 10.1016/j.neurol.2025.07.011.
6. Tsiakiri, A., S. Plakias, G. Giarmatzis, G. Tsakni, F. Christidi et al. Wearable Sensor Technologies and Gait Analysis for Early Detection of Dementia: Trends and Future Directions. Sensors (Basel), Dec 18;25(24):7669, 2025, doi: 10.3390/s25247669.
7. Bonanno, M., A. Lelo, P. De Pasquale, A. Celesti, A. M. De Nunzio, A. Quartarone and R. S. Calabrò. Use of Wearable Sensors to Assess Fall Risk in Neurological Disorders: Systematic Review. JMIR Mhealth Uhealth. Aug 18;13:e67265, 2025, doi: 10.2196/67265.
8. Tucker, A., T. E. Goldberg and H. Kim. Biomarkers of sleep-wake disturbance as predictors of cognitive decline and accelerated disease progression. Expert Rev Mol Diagn. Aug;24(8):649–657, 2024, doi: 10.1080/14737159.2024.2389307.
9. Chan, A., J. Cai, L. Qian, B. Coutts, S. Phan, G. Gregson, M. Lipsett and A. M. Ríos Rincón. In-Home Positioning for Remote Home Health Monitoring in Older Adults: Systematic Review. JMIR Aging. Dec 2;7:e57320, 2024, doi: 10.2196/57320.
10. Kim, D., H. Bian, C. K. Chang, L. Dong and J. Margrett. In-Home Monitoring Technology for Aging in Place: Scoping Review. Interact J Med Res. Sep 1;11(2):e39005, 2022, doi: 10.2196/39005.

11. Gramkow, M. H., H. S. C. Gleerup, A. H. Simonsen, G. Waldemar and K. S. Frederiksen. Digital biomarkers in early Alzheimer's disease from wearable or portable technology: A scoping review. J Neurol Sci. Feb 15;481:125734. 2026, doi: 10.1016/j.jns.2026.125734.
12. Fowe, I. E., E. C. Sanders and W. R. Boot. Understanding Barriers to the Collection of Mobile and Wearable Device Data to Monitor Health and Cognition in Older Adults: A Scoping Review. AMIA Jt Summits Transl Sci Proc. Jun 16;2023:186–195, 2023.
13. He, C., X. Yu, Y. Zhang, Y. Li and N. Jiang. Wearable EEG devices in the detection of mild cognitive impairment: a systematic review. NPJ Digit Med. Feb 6;9(1):265, 2026, doi: 10.1038/s41746-026-02342-w.
14. Swain-Velasco, A., K. Hynes, S. D. Shenkin and M. Drummond. Perceptions of care home residents, families and staff about wearable devices: a scoping review. Eur Geriatr Med. Aug;17(4):2323–2336, 2026, doi: 10.1007/s41999-026-01550-7.
15. Bonvino, A., E. Cornacchia, G. F. Scaramuzzi, D. Gasparre, V. Manippa, D. Rivolta and P. Taurisano. Digital Tools for Mild Cognitive Impairment: A Systematic Review and Meta-analysis of Diagnostic Accuracy and Methodological Challenges. Neuropsychol Rev. Sep;36(3):375–387, 2026, doi: 10.1007/s11065-025-09680-8.
16. Wang, A. Y., H. Y. Hu, Y. N. Ou, Z. T. Wang, Y. H. Ma, L. Tan and J. T. Yu. Socioeconomic Status and Risks of Cognitive Impairment and Dementia: A Systematic Review and Meta-Analysis of 39 Prospective Studies. J Prev Alzheimers Dis. 10(1):83–94, 2023; doi: 10.14283/jpad.2022.81.
17. Tricco, A. C., E. Lillie, W. Zarin, K. O'Brien, H. Colquhoun, D. Leva, et al. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. Ann Intern Med., 169 (7), 467–473, 2018, https://doi.org/10.7326/M18-0850, https://www.acpjournals.org/doi/full/10.7326/M18-0850?journalCode=aim
18. Chai, Z., Y. Zhou and H. Yu. AI-Driven Wearable Sensor Analytics for Dementia Monitoring: Machine Learning, Deep Learning, and Emerging Foundation-Model Opportunities, 2026 31st International Conference on Automation and Computing (ICAC), High Wycombe, Buckinghamshire, United Kingdom, 1–6, 2026, doi: 10.1109/ICAC70325.2026.11712318.
19. Tiantian, Yu., Li Mintao, R. Ruhizal Roosli and D. Dong. AI-Enhanced Wearable Systems for Proactive Detection of Cognitive Decline in Elderly People, International Journal of Humanoid Robotics Online Ready, 2026, https://www.worldscientific.com/doi/full/10.1142/S0219843626400086

Session 2

Aerospace Technologies and Biotechnologies

Chairmen: Prof. Georgi Sotirov

Secretary: Assoc. Prof. Nikolay Zagorski

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА МЕЖДУНАРОДНАТА КОСМИЧЕСКА СТАНЦИЯ ПРИ НАВЛИЗАНЕ В ПЛЪТНИТЕ СЛОЕВЕ НА АТМОСФЕРАТА

Петър Гецов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgetsovp@mail.bg; getsovp@space.bas.bg

Ключови думи: *Международна космическа станция, финален маньовър, плътни слоеве, атмосфера*

Резюме: *В доклада са разгледани въпросите и сроковете, свързани с прекратяване на съществуването на Международната космическа станция. Определени са параметрите на финалния маньовър при навлизането в плътните слоеве на атмосферата.*

STUDY OF THE DYNAMICS OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION UPON ENTRY INTO THE DENSE LAYERS OF THE ATMOSPHERE

Petar Getsov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgetsovp@mail.bg; getsovp@space.bas.bg

Keywords: *International Space Station, final maneuver, dense layers, atmosphere*

Abstract*: The report examines the issues and timelines related to the termination of the International Space Station. The parameters of the final maneuver upon entering the dense layers of the atmosphere are determined.*

Въведение

Създаването на Международната Космическа Станция (МКС) е много интересен момент от еволюцията на космическите изследвания. През първите години непосредствено след извеждането от орбита през 2001 г. на станцията Мир – руския предшественик на МКС, на борда и се провеждат множество международни проекти. Историята на пилотираните полети до този момент е преди всичко космическа надпревара. Руснаците заложиха на „дългосрочните полети“ с космически станции, а американците – по пътя на „кратките полети“. Това бяха два различни подхода и логика на конкуренцията.

Един от положителните аспекти на МКС е, че се създаде програма на сътрудничество, единствено съществуваща и до днес. МКС е мисия, посветена на човешкото сътрудничество и взаимодействието между хората извън границите на езиците и културата. Повече от 25 години има хора в Космоса, 7 дни в седмицата и 365 дни в годината, което доказва, че може да се намира решение вместо да се воюва. Времето обаче минава и оборудването остарява.

Характеристики на МКС

Международната космическа станция представлява най-големият изкуствен обект в орбита около Земята. Нейната настояща конфигурация, тегло и размери са следните:

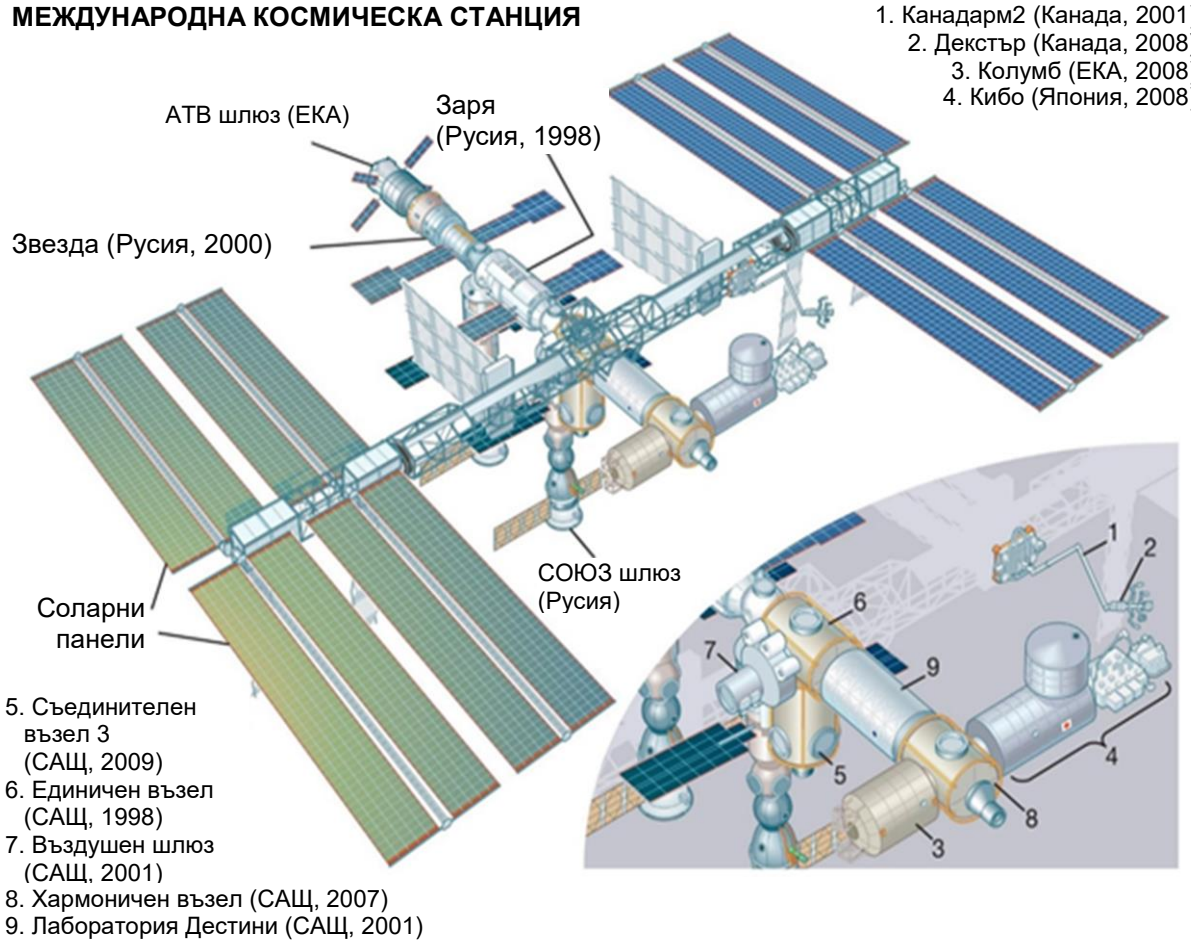
- Физическите мащаби на МКС се равняват приблизително на площта на футболно игрище [1];
- Общо тегло (маса): Около 420 000 kg (420 t) (без теглото на временно скачените транспортни и екипажни кораби);
- Дължина на централната ферма: 109 m;
- Размах на крилата (слънчевите панели): 73 m;

- Херметизиран обем: 1005 m^3;
- Обитаем обем: Около 388 m^3 (свободното пространство, в което екипажът живее и работи).

Orbital Radar

Станцията е разделена на два основни, взаимно свързани сегмента – Руски орбитален сегмент (ROS) и Американски орбитален сегмент (USOS), който интегрира и модулите на Европейската (ESA), Японската (JAXA) и Канадската (CSA) космически агенции. Общо комплексът включва 16 херметизирани модула.

На фиг. 1 е показан пълния състав на структурната схема на основните модули на МКС по компоненти и как отделните херметични цилиндри се напасват в обща система [2].



Фиг. 1. Схема на компонентите на МКС

Жизнен цикъл на Международната Космическа Станция

На борда на този огромен комплекс се поддържа постоянен работен режим на екипаж от 6 до 7 астронавти и космонавти.

Планираният край на експлоатацията на МКС е в края на 2030 г., а самото контролирано извеждане от орбита (деорбитиране) и изгаряне в атмосферата ще се случи през януари 2031 г.

В Конгреса на САЩ се обсъжда вариант за удължаване на срока до 2032 г., за да няма времеви прозорец без работеща станция в орбита преди появата на частните търговски наследници. Въпреки това официалният график към момента остава януари 2031 г. [1]

Основният фактор за края на мисията е умората на метала. Поради непрекъснатото преминаване от сянка към слънчева светлина на всеки 90 min (температурни разлики от +120°C до -120°C), по корпуса се появяват микропукнатини и загуби на херметичност, което прави поддръжката неефективна и опасна спрямо новите частни космически станции.[5, 6]

Тъй като станцията е твърде тежка, за да бъде свалена безопасно само от руските кораби „Прогрес“ (както се планираше първоначално). През лятото на 2024 г. НАСА обяви че е избрала компанията на Илон Мъск да построи модул способен да изтласка МКС към земната

атмосфера, което ще позволи нейното унищожаване след извеждането и от експлоатация през 2031 г. НАСА сключи договор със SpaceX за създаването на U.S. Deorbit Vehicle (USDV). Това ще бъде модифициран кораб Dragon, снабден с голям резервоар и общо 46 двигателя Draco. Той ще се скачи с МКС една-две години преди края и ще бъде основната задвижваща сила за финалния удар. Този модул ще забави МКС и ще позволи да направи прецизно връщане в атмосферата над Тихия океан далеч от континентите.[1]

Станцията ще бъде свалена в почти пълния си настоящ състав (цялата съвкупност от американски, руски, европейски и японски модули, фермовите конструкции и слънчевите панели), с обща маса около 450 t.

Някои по-малки компоненти, оборудване и исторически артефакти ще бъдат прибрани на Земята с товарни кораби преди финала. Освен това, към МКС ще бъде скачен специалният кораб U.S. Deorbit Vehicle (USDV) [1].

За контролирано извеждане на обект с мащабите на МКС не е необходимо да бъде прекратено движението напълно (което би изисквало колосално количество гориво), а само да се снижи перигеят (най-ниската точка на орбитата) дълбоко в плътните слоеве на атмосферата.

В периода (2028–2031 г.) станцията ще прекрати да коригира орбитата си нагоре и под влиянието на земната атмосфера и постепенно ще слезе от 400 km до около 280 km. Последният екипаж ще я напусне при достигане на критична височина. Двигателите на USDV ще създадат мощна серия от спирачни импулси.

Финален маньовър за навлизане на МКС в плътните слоеве на атмосферата

За финалната маневра за навлизане в атмосферата е необходим спирачен импулс ($\triangle v$) от порядъка на 50 до 60 m/s (около 180–215 km/h промяна в скоростта. На пръв поглед това е малко, на фона на орбиталната скорост на МКС от 7.67 km/s или 27 000 km/h, но е напълно достатъчно да "забие" станцията в атмосферата под точен ъгъл [3].

Преходът по елиптичната траектория от точката на импулса (400 km) до първия контакт с атмосферата (100 km) отнема около 33.7 min, а пълното движение до перигея (50 km) е точно полупериодът на елипсата – 44.4 min (44 min и 26 s) [3].

Периодът на обиколка по новата елиптична траектория се определя от Третия закон на Кеплер:

- $T = 2\pi\mu a3$
- Голяма полуос: a = 6 596 km
- Гравитационен параметър: μ = 398 600 km3/s2

$T = 2\pi 398\ 6006\ 5963 = 2\pi 719\ 956.7 \approx 5\ 331.3$ секунди (≈ 88.85 минути).

Маньовърът се извършва в най-високата точка (апогея). Движението от апогея до най-ниската точка (перигея) (50 km) отнема точно половината от пълния период:

T апогей→перигей $2T = 25\ 331.3 \approx 2\ 665.6$ s ≈ 44.43 min (44 min. 26 s.)

За начало на атмосферно навлизане в космонавтиката се приема височина

h_{entry} = 100 km (Линията на Карман).

Времето, за което апаратът преминава последния участък от 100 km до перигея (50 km), при ексцентрицитет $e \approx 0.0265$ е около 10.7 min [4].

От момента на спирачния импулс до първия контакт с плътната атмосфера изтичат:

$t_{навлизане} = 44.43 - 10.7 \approx 33.73$ min (≈ 33 min 44 s)

След този 34-минутен преход аеродинамичното съпротивление бързо забавя апарата и го разрушава в рамките на следващите 5–10 min.

Термичното разпадане и интензивното аеродинамично спиране започват около 42 до 43 min след подаването на спирачния импулс.

При навлизане в атмосферата с първа космическа скорост (около 7.8 km/s или 28 000 km/h), температурата на повърхността на топлинния щит достига между 1 400°C и 1 650°C, а в газовия слой непосредствено пред апарата въздухът се йонизира в плазма с температура над 6 000°C – по-горещо от повърхността на Слънцето.

Често срещано заблуждение е, че апаратът се нагрява от триенето с въздуха. В действителност над 80–90% от топлината се генерира от ударна компресия (адиабатно сгъстяване).

Движейки се с 23 пъти скоростта на звука, апаратът блъска въздушните молекули пред себе си толкова бързо, че те нямат време да се раздалечат.

Въздухът се сгъстява драстично за части от секундата, което води до скок в температурата и превръщането му в светещ плазмен слой.

Ударната вълна (плазмен слой 6000°C – 7000°C) се образува броени сантиметри пред челната част на станцията поради свръхзвуковата компресия.

Челния топлинен щит е подложен на температура от 1400°C до 1650°C. Това е най-натоварената точка от конструкцията. Съвременните материали (като PICA-X при Crew Dragon) издържат на тези температури чрез аблация (постепенно контролирано изгаряне и отнемане на топлината).

Челни ръбове и крила са подложени на температура 1200°C – 1500°C.

Задната страна (подветрена зона) – 300°C – 600°C. Зоната е закрита от челната ударна вълна, затова изпитва значително по-ниски термични натоварвания.

По-голямата част от МКС ще изгори от триенето в атмосферата поради огромната температура, но най-плътните и масивни титанови и стоманени елементи ще паднат в океана.

Алуминият, от който е изградена по-голямата част от корпуса на МКС, се топи при едва 660°C, а стоманата – при около 1 400°C. Затова при навлизане без топлинен щит модулите омекват, разкъсват се от аеродинамичните сили и се изпаряват напълно между 80 km и 40 km височина [5, 6].

Целият процес на прекратяването на съществуването на МКС ще осигури насочването на станцията към т.нар. Точка Немо в Южния Пасифик (Южния Тихи океан) [1], явяващо се най-отдалеченото от суша и хора място на планетата, което ще позволи останките от станцията да не засегнат обекти от корабоплаването и инфраструктурата. Точката Немо се намира на приблизително 2688 km от най-близката суша, а МКС, която се намира на приблизително 400 km над земната повърхност, е по-близо до тази точка, отколкото всеки човек на сушата. Дълбочината на океана в тази област достига приблизително 4000 m.

Изводи

Поради доброто състояние на основните системи има международни споразумения между НАСА, Европейската космическа агенция (ESA), Япония (JAXA) и Канада (CSA) удължиха участието си до 2030 г. Русия (Роскосмос) потвърди участието си поне до 2028 г. [1]

Планираното извеждане на МКС през 2031 г. ще отбележи края сътрудничество без граници в областта на космическите изследвания, която стана неизменна част от всекидневието на земните жители и сфера на националните интерес.

В повечето случаи МКС ще бъде заменена от национални или съюзни станции имащи двойно назначение.

Литература:

1. https://www.nasa.gov/international-space-station
2. Encyclopaedia Britannica / Universal Images Group via Getty Images)
3. Ivanov N.M, A.A.Dimitrievskii, L.N.Lisenko at all, Balistika i navigatsia kosmicheskih apparatov, Moskva, Mashinostroenie, 1986, 296 p.
4. Getsov P, DETERMINATION OF INTERNATIONAL SPACE STATION ORBIT CORRECTION FUEL CONSUMPTION WITH PROGRESS SHIP, Доклади на Българската академия на науките Comptes rendus de l'Acad´emie bulgare des Sciences, 2024,ENGINEERING SCIENCES
5. Peter Getsov, Dimitar Teodosiev, Nikolay Zagorski, Garo Mardirossian, Dimo Zafirov, IMPACT OF SPACECRAFT AND ISS ENGINES ON EXPERIMENTAL SAMPLES OF VARIOUS MATERIALS MOUNTED ON THE OUTER SURFACE OF THE ZVEZDA MODULE, Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute, Aerospace Research in Bulgaria. 36, 2024, Sofia
6. Dimitar Teodosiev, Anna Bouzekova-Penkova, Korneli Grigorov, Rumen Nedkov, Peter Tzvetkov, Boyko Tsyntsarski, Angelina Kosateva, Stanislav Klimov, Valery Grushin, STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS-CARBON COATINGS AFTER AN EXTENDED STAY ON THE INTERNATIONAL SPACE STATION (ISS), Доклади на Българската академия на науките Comptes rendus de l'Acad´emie bulgare des Sciences Tome 74, No 2, 2021
7. https://www.bing.com/search?q=Orbital+Radar&FORM=ANAB01&PC=LCTS

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

NUMERICAL IMPLEMENTATION OF CONTROL LAW(S) FOR PROPULSIVE ROCKET LANDING

Konstantin Metodiev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: komet@space.bas.bg

Keywords: *Rocket, Proportional-Integral-Derivative, Sliding Mode Control, GNU Octave*

Abstract: *This study introduces a computational approach toward implementing Proportional-Integral-Derivative (PID) and Sliding Mode Control (SMC) strategies to control rocket propulsive landings. GNU Octave environment is used to integrate linear and angular momentum conservation laws within body-fixed coordinates, complemented by quaternion-based attitude dynamics modeling. Real-time trajectory visualization is achieved through a simplex connection with FlightGear via UDP protocol. The obtained results highlight the ability of PID and SMC architectures to secure stable touchdowns under various conditions. The results also illustrate the resilience of these systems to dynamic disturbances that characterizes atmospheric re-entry situations from low Earth orbit.*

ЧИСЛЕНА РЕАЛИЗАЦИЯ НА РЕГУЛАТОР(И) ЗА ВЕРТИКАЛНО КАЦАНЕ НА РАКЕТА

Константин Методиев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: komet@space.bas.bg

Ключови думи: *Ракета, PID регулатор, SMC регулатор, GNU Octave*

Резюме: *Това изследване представя изчислителен подход към реализация на PID и SMC регулатори за управление на вертикално кацане на ракета. Използваната среда за интегриране на законите за запазване на количеството на движение и кинетичния момент в свързана координатна система е GNU Octave, като ориентацията на ракетата в пространството се определя чрез кватерниони. Визуализация на траекторията в реално време се постига чрез еднопосочна връзка с FlightGear по UDP протокол. Получените резултати подчертават способността на PID и SMC архитектурите да осигуряват стабилни кацания при различни условия. Резултатите също показват устойчивостта на тези системи към динамични смущения, типични при навлизане в атмосферата от околоземна орбита.*

Introduction

The importance of vertical landing technology lies in its potential to reduce the cost and increase the spaceflight efficiency. Rockets consume large amounts of propellant during launch, making single-use missions economically unsustainable in the long term.

Vertical landing addresses two key challenges. Firstly, it enables reusability by allowing rocket stages to return to Earth intact and be used for future missions. This greatly lowers launch costs compared to traditional disposable systems. Secondly, reusable launch vehicles might be able to support future modular deep-space transportation systems.

Current study employs two approaches towards simulating a rocket propulsive landing: Proportional-Integral-Derivative and Sliding Mode Controllers. The rocket flight is purely virtual. The flight dynamics states are computed in GNU Octave environment, [1], whilst the flight trajectory is visualized in FlightGear, [2] simulator. The project goal is to show that the maneuver under consideration is feasible enough to make it possible for coding in a high-level programming language.

Governing equations

To estimate the body linear rates, the equation of linear momentum conservation is integrated in body reference frame:

(1) $$\dot{\mathbf{v}} = \left(m\mathbf{I}_{3,3}^{-1}\right)\left[\mathbf{F} - \boldsymbol{\omega}\times\left(m\mathbf{v}\right)\right],$$

where $\mathbf{I}_{3,3}$ is 3x3 identity matrix, *m* = *const* stands for the body mass, $\mathbf{v} = [u, v, w]^T$ denotes a linear rates (velocities) vector, and **F** is a vector of forces externally applied to the system.

To estimate the body angular rates, the equation of angular momentum conservation is integrated in body reference frame:

(2) $$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{I}^{-1}\left[\mathbf{M} - \boldsymbol{\omega}\times\left(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}\right)\right],$$

where **I** stands for a 3x3 inertia tensor, $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]^T$ denotes an angular rates vector, and **M** is a vector of torques externally applied to the system. Mass, principal moments, and products of inertia are measured in a CAD environment in order to be used further in serial computations.

To estimate the body attitude and avoid gimbal lock (singularity) all together, it's preferable to propagate quaternion $\mathbf{q} = [q_w, q_x, q_y, q_z]^T$ by integrating the kinematic equation:

(3) $$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2}\mathbf{q}\otimes\begin{Vmatrix}0\\ \boldsymbol{\omega}\end{Vmatrix} = \frac{1}{2}\begin{Vmatrix}0 & -\boldsymbol{\omega}^T\\ \boldsymbol{\omega} & -\left[\boldsymbol{\omega}\right]\times_{3,3}\end{Vmatrix}\mathbf{q}.$$

The symbol []×3,3 denotes a skew-symmetric (cross-product) matrix, for example

(4) $$\left[\boldsymbol{\omega}\right]\times_{3,3} = \begin{Vmatrix}0 & -r & q\\ r & 0 & -p\\ -q & p & 0\end{Vmatrix}.$$

To estimate the body position, it is sufficient to transform the linear velocity from body to inertial reference frame and integrate afterwards, i.e.

(5) $$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{R}\mathbf{v},$$

where **R** stands for a transformation matrix from body to inertial reference frame, $\mathbf{v} = [u, v, w]^T$ is a velocity vector written in body reference frame.

The so-formed system of thirteen first order ordinary differential equations (ODE) from (1) to (3) and (5) is further integrated in GNU Octave environment by `ode45` function. The function implements Dormant-Prince method which is a member of the Runge-Kutta family of ODE solvers. It is an explicit, adaptive step, 4th and 5th order accurate method solely applicable to non-stiff systems. The state vector acquires definitive form $\mathbf{x} = [x, y, z, u, v, w, p, q, r, q_w, q_x, q_y, q_z]^T$.

To account for external forces **F** and torques **M** acting on a body, as well as its linear velocity components, coordinate transformations are necessary – specifically using a rotation matrix derived from a ZYX Euler angle sequence to toggle between body-fixed frame and inertial reference frame.

(6) $$\mathbf{R} = \begin{Vmatrix}C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\varphi - S_\psi C_\varphi & C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi\\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\varphi + C_\psi C_\varphi & S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi\\ -S_\theta & C_\theta S_\varphi & C_\theta C_\varphi\end{Vmatrix},$$

where Sx = sin(x) and Cx = cos(x). The transformation matrix **R** is orthogonal, hence $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.

Alternatively, the rotation matrix can be computed using quaternions. Given a unit vector representing the rotation axis and an associated angle of rotation θ, those define the quaternion components accordingly.

(7) $$q_w = \cos\left(\theta/2\right)\quad q_x = a_x\sin\left(\theta/2\right)\quad q_y = a_y\sin\left(\theta/2\right)\quad q_z = a_z\sin\left(\theta/2\right).$$

This formula is applied sequentially to the axis Cartesian components – such as [0, 0, az], [0, ay, 0], [ax, 0, 0] – along with their corresponding Euler angles [0, 0, ψ], [0, θ, 0], and [φ, 0, 0] following a rotation sequence (for example, ZYX) given in advance. This process yields three individual quaternions: q1, q2, and q3, which are then multiplied.

Quaternions are frequently split into a scalar term s and a vector term **v**

(8) $$q = \begin{bmatrix}s & \mathbf{v}\end{bmatrix}\quad s\in\mathbb{R}\quad \mathbf{v} = a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}.$$

Using the notation above, the quaternion product is computed using the formula

(9) $$q_1q_2 = \left(s_1s_2 - \mathbf{v}_1\mathbf{v}_2\right) + \left(s_1\mathbf{v}_2 + s_2\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_1\times\mathbf{v}_2\right).$$

Then, the transformation matrix (from body to inertial frame of reference) for any rotation sequence is derived from the product [qw,qx,qy,qz] = (q1q2)q3 as follows

$$\mathbf{R} = \begin{Vmatrix} 2\left(q_w^2 + q_x^2\right) - 1 & 2\left(q_x q_y - q_w q_z\right) & 2\left(q_x q_z + q_w q_y\right) \\ 2\left(q_x q_y + q_w q_z\right) & 2\left(q_w^2 + q_y^2\right) - 1 & 2\left(q_y q_z - q_w q_x\right) \\ 2\left(q_x q_z - q_w q_y\right) & 2\left(q_y q_z + q_w q_x\right) & 2\left(q_w^2 + q_z^2\right) - 1 \end{Vmatrix}. \quad (10)$$

A PID, or **Proportional-Integral-Derivative** controller is a type of feedback control loop that is extensively used in industrial automation. The PID controller maintains the output variable (process, PV) close to the target value (setpoint, SP) by minimizing the error e(t) between the two through continuous summation of proportional, integral, and derivative additives. The control signal is computed by renowned formula:

$$\mathbf{u}(t) = K_p \mathbf{e}(t) + K_i \int_0^t \mathbf{e}(\tau)\, d\tau + K_d \frac{d}{dt}\mathbf{e}(t), \quad (11)$$

where e(t) = SP – PV, Kp, Ki, Kd are proportional, integral, and differential gains respectively. Each additive could be interpreted as follows.

- The **proportional** gain responds to the current error. The output is directly proportional to the present difference between SP and PV (error = SP – PV). A high Kp gain reduces the immediate error but can cause overshoot or oscillation if too large.
- The **integral** gain eliminates steady-state errors by integrating the error over time. It acts as a "memory" of past errors, ensuring that even small persistent differences between setpoint and actual value eventually result in corrective action. However, excessive Ki gain can cause sluggish response or instability due to integral windup.
- The **derivative** gain predicts future error based on the rate at which the current error is changing. It helps dampen overshoot by opposing rapid changes in output before they become problematic. Kd gain reduces oscillations but may introduce noise sensitivity if not tuned properly.

PID control system is preferred since it can perform excellently with simple tuning by means of the Ziegler-Nichols technique or modern optimization approaches. In spite of this, tuning of PID controllers still poses an engineering challenge owing to system nonlinearities and time delays.

Two PID controllers are implemented in the current project: a position PID and an attitude PID. Implementing the position PID controller in time domain is straightforward. The attitude PID controller estimates a difference between the current orientation (represented as a quaternion) and an initial reference orientation – such as [1, 0, 0, 0], which signifies no rotation or upright alignment (a standard "rocket-stationary" state). The error quaternion is calculated by taking a dot product of the current quaternion (process value) and conjugate of the desired one (setpoint). When both quaternions are identical, their imaginary components vanish in this operation; otherwise, a control output is generated by the PID algorithm to correct the deviation.

A SMC, or **Sliding Mode Controller** is a nonlinear control approach wherein system dynamics is initially allowed to follow nonlinear trajectories determined in the phase portrait by open-loop behavior before being forced to slide onto an initially defined line, often called "state-space sliding surface." Upon reaching the surface, the system states are directed and kept there, thus guaranteeing robustness against parameter uncertainties and external disturbances.

The position and velocity setpoints in case of translational motion are **x** = **x**d and **v**d = **0**. Another commonly used sliding surface is

$$\mathbf{s} = \mathbf{e}_v + \mathbf{\Lambda}\mathbf{e}_x, \quad (12)$$

where new state variables **e**v = **v**i – **v**d and **e**x = **x**i – **x**d, **Λ** = diag(λx, λy, λz), λi > 0 is an adjustable parameter matrix. The velocity **v**i is transformed according to eq. (5) from body to inertial reference frame. If the setpoint **x**d is constant, then error vector **e**x is simply a coordinate system shift, therefore the sliding surface geometry remains unchanged.

If differentiate the surface equation (12), it gives

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{e}}_v + \mathbf{\Lambda}\dot{\mathbf{e}}_x, \quad (13)$$

where vector

$$\dot{\mathbf{e}}_v = \frac{\mathbf{F}_I}{m} + \mathbf{g} - \ddot{\mathbf{x}}_d. \quad (14)$$

This presentation is better for tracking a reference point instead of zero state. It is derived from linear momentum conservation equation written in inertial reference frame. Taking into account that

$$\dot{\mathbf{e}}_x = \dot{\mathbf{x}}_I - \dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{v}_I - \mathbf{v}_d = \mathbf{e}_v \quad (15)$$

and for a fixed setpoint

(16) $\ddot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{0}$

then

(17) $\dot{\mathbf{s}} = \frac{\mathbf{F}_I}{m} + \mathbf{g} + \mathbf{\Lambda}\mathbf{e}_v$.

The reaching condition usually implies

(18) $\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{K}.sat(\mathbf{s})$,

where *sat* stands for saturation function, **K** = diag(Kx, Ky, Kz), Ki > 0 is an adjustable parameter matrix. After substituting in eq. (17)

(19) $\frac{\mathbf{F}_I}{m} + \mathbf{g} + \mathbf{\Lambda}\mathbf{e}_v = -\mathbf{K}.sat(\mathbf{s})$

and solve for **F**I, following formula is obtained to compute linear control law (translational motion)

(20) $\mathbf{F}_I = -m\mathbf{\Lambda}\mathbf{e}_v - m\mathbf{K}.sat(\mathbf{s}) - m\mathbf{g}$

which is an exact force law for the rocket to reach desired position. It must be transformed back to body reference frame

(21) $\mathbf{F}_b = \mathbf{R}^T\mathbf{F}_I$.

Angular control law (rotational motion) is computed likewise. Consider equation of angular momentum conservation written in body reference frame and rearranged with respect to d**ω**/dt:

(22) $\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{I}^{-1}\left[\mathbf{M} - \boldsymbol{\omega}\times(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega})\right]$.

Define a sliding surface

(23) $\mathbf{s} = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{\Lambda}_{att}\mathbf{q}_v$,

where

(24) $\mathbf{q}_{err} = \mathbf{q}_0^* \otimes \mathbf{q}$

and

(25) $\mathbf{q}_v = \mathbf{q}_{err}(2:4)$

is the vector part of the error quaternion. The goal is to make system reach **s** = **0** and slide along it.

The SMC reaching law implies

(26) $\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{K}.sat(\mathbf{s})$,

where saturation is used to reduce chattering. After differentiating (23)

(27) $\dot{\mathbf{s}} = \dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{\Lambda}_{att}\dot{\mathbf{q}}_v$

and substituting for d**ω**/dt (22) and reaching law (26)

(28) $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{I}^{-1}\left[\mathbf{M} - \boldsymbol{\omega}\times(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega})\right] + \mathbf{\Lambda}_{att}\dot{\mathbf{q}}_v = -\mathbf{K}_{att}.sat(\mathbf{s})$.

In last formula, **Λ**att = diag(λx, λy, λz), λi > 0, **K**att = diag(Kx, Ky, Kz), Ki > 0 are adjustable parameter matrices. Rearranging with regard to **M**, it yields

(29) $\mathbf{M} = -\mathbf{I}\mathbf{\Lambda}_{att}\dot{\mathbf{q}}_v - \mathbf{I}\mathbf{K}_{att}.sat(\mathbf{s}) + \boldsymbol{\omega}\times(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega})$.

The formula above is an exact SMC torque law.

The error quaternion is defined as

(30) $\mathbf{q}_{err} = \begin{Vmatrix} q_0 \\ \mathbf{q}_v \end{Vmatrix}$.

In context of quaternion kinematics, the derivative of quaternion is given by

(31) $\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2}\mathbf{q} \otimes \begin{Vmatrix} 0 \\ \boldsymbol{\omega} \end{Vmatrix}$.

When expanded into its scalar and vector components, the vector part is expressed as:

(32) $\dot{\mathbf{q}}_v = \frac{1}{2}\left(q_0\boldsymbol{\omega} + \mathbf{q}_v \times \boldsymbol{\omega}\right)$.

Using the skew-symmetric matrix notation to represent the cross product, the formula becomes

(33) $\dot{\mathbf{q}}_v = \frac{1}{2}\left(q_0\mathbf{I}_{3,3} + [\mathbf{q}_v]\times\right)\boldsymbol{\omega}$,

where $\mathbf{I}_{3,3}$ stands for an identity matrix. Near desired attitude $\mathbf{q}$ = [1, 0, 0, 0], q0 ≈ 1 and $\mathbf{q}v \approx \mathbf{0}$, hence the approximation

$$\dot{\mathbf{q}}_v \approx \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}. \tag{34}$$

Substituting into the exact law (29):

$$\mathbf{M} \approx -\frac{1}{2}\mathbf{I}\boldsymbol{\Lambda}_{att}\boldsymbol{\omega} - \mathbf{I}\mathbf{K}_{att}.sat(\mathbf{s}) + \boldsymbol{\omega}\times(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) \tag{35}$$

which is an approximate torque law for the rocket to stay upright.

The *sat* function taking part in (20) and (35) is employed so as to reduce control chattering as specified by the following formulae

$$sat(\mathbf{s}) = \begin{cases} \mathbf{s}/\varphi & if \quad \mathbf{s}/\varphi \le 1 \\ sign(\mathbf{s}) & otherwise \end{cases}, \tag{36}$$

where value of **s** surface is computed by either (12) or (23) depending on type of motion (linear, angular) the rocket undergoes.

A simplex UDP connection between GNU Octave and FlightGear is established via UDP protocol for visualization purposes. In order to do so, it is necessary to upload an XML file in directory `%FlightGearInstallDir%\fgdata_2024_1\Protocol` for the flight simulator to interpret incoming UDP data. The XML file is composed by chunks for timestamp, position, and attitude variables being transmitted to the simulator. The UDP sender implemented in GNU Octave must send these variables in same order precisely. Given XML file name `myRocket.xml`, localhost resolved to IP address 127.0.0.1, port 5500, update rate of 50 Hz, FlightGear must be started with following script:

```
--generic=socket,in,50,127.0.0.1,5500,udp,myRocket
--fdm=null
--altitude=1250
--httpd=8080
```

I/O functions used in current study to establish a serial UDP communication are implemented in `instrument-control` package, [3]. The rocket model folder might be copied from almost any aircraft already installed to the simulator. The CAD file with .ac extension must be replaced, though.

Results

Following figure illustrates the rocket CAD model in FlightGear and GNU Octave environment prior to commencing numerical experiment. In the figure, the rocket stance does not correspond to initial conditions for visualization purpose. In Octave console, it is necessary to type and execute the line `pkg load instrument-control` prior to commencing the simulation.

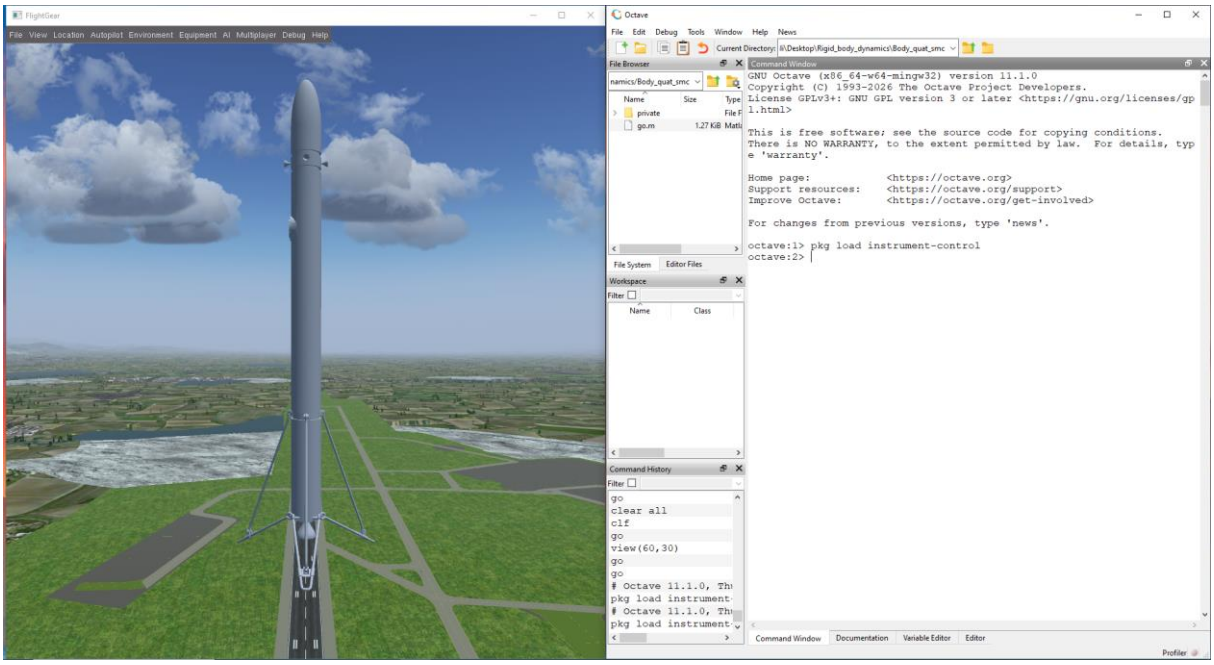


Fig. 1. A CAD model of the rocket in FlightGear

Following graphs illustrate the rocket trajectory during numerical simulation. The initial conditions used in numerical experiments with both controllers are pitch angle `-pi/2` rad (head down), height of 1250 m, and zero velocity. The setpoint is height 10 m, zero velocity, upright stance. At the simulation onset, two forces set the rocket in motion: the gravity and a constant aerodynamic drag. The trajectory is divided into two stages:

- stage 1–2: landing approach, during which the rocket is descending and taking an upright stance simultaneously
- stage 2–3: touchdown, which is self-explanatory

The initial conditions are clearly discernable, for example the blue axis is pointing downwards, initial height on Z axis and so on, so is a slight trajectory overshoot in PID control case.

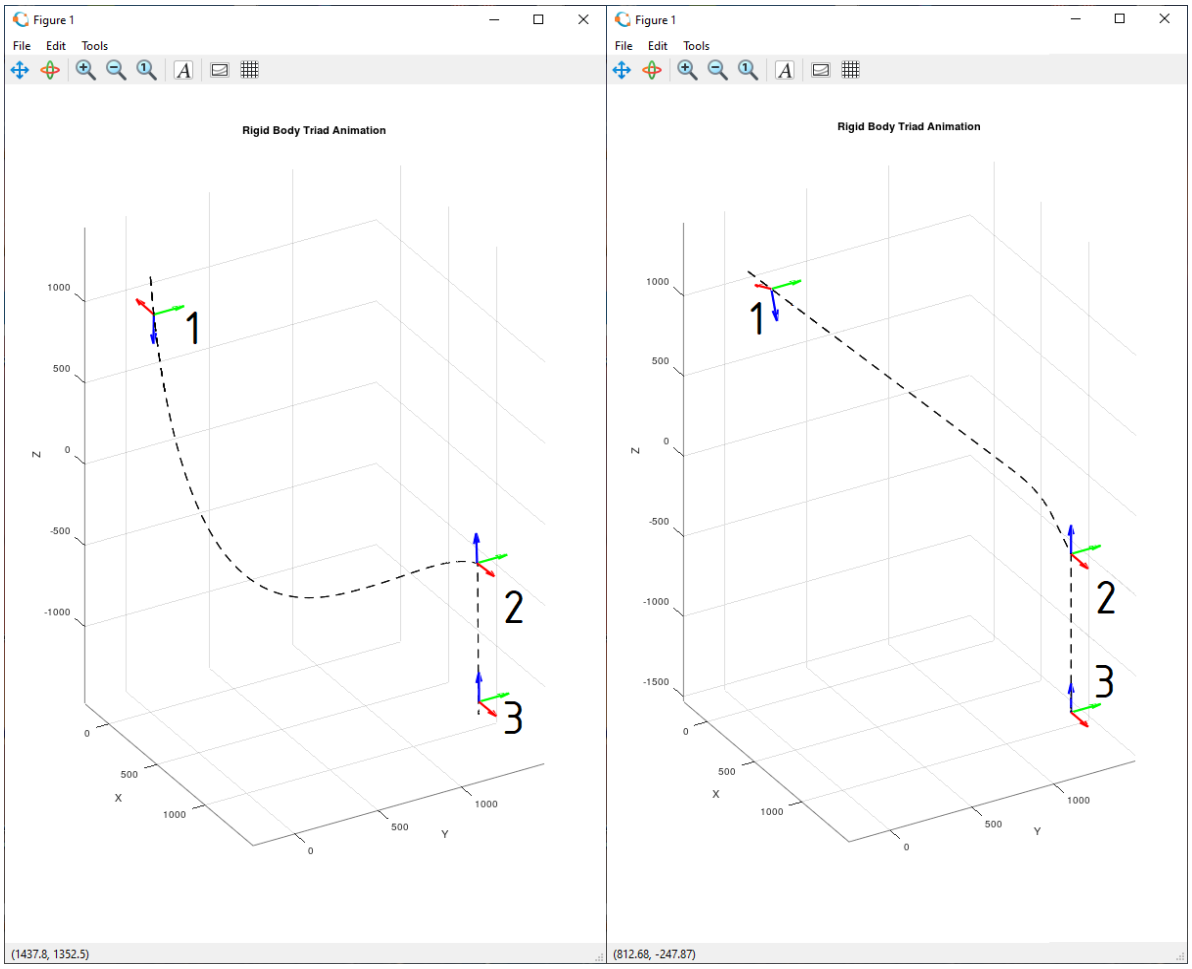


Fig. 2. Landing trajectory: PID controller (left) and SM Controller

Discussion

The current research presumes the rocket is fully actuated which is almost never the case. A hypothetical rocket with thrusters producing forces in x, y, z directions and a torque generator about roll, pitch, yaw angles could control all six degrees of freedom (DOF) independently. A simplified and achievable landing model however solely possesses thrust magnitude and two gimbal angles control, i.e. three control inputs acting upon a 6-DOF vehicle. Still, suggested research and developed source code demonstrate how to implement PID and SMC controllers in time domain, which is a good prerequisite to developing a feasible model.

The developed source code may be downloaded from link [4], as may a short demonstration video. Giving a quotation credit to the author is obligatory prior to using the code.

References:

1. https://octave.org/
2. https://www.flightgear.org/
3. https://octave.sourceforge.io/instrument-control/overview.html
4. https://github.com/samolet4e/Propulsive-rocket-landing

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE TYPE FLIGHT MODEL OF AN AS532AL COUGAR HELICOPTER WITH AN EXTERNAL FIRE EXTINGUISHING DEVICE OF THE "BAMBI BUCKET BB4453" TYPE FOR EXTINGUISHING FIRES

Nikolay Zagorski

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: nzagorski@space.bas.bg

Keywords: *helicopter, external fire extinguishing device, aerodynamic characteristics*

Abstract: *This article presents an analytical description of the model of a helicopter with an external fire extinguishing device in flight for extinguishing fires. The research is related to the helicopters used for this purpose by the Air Force of the Republic of Bulgaria AS532AL Cougar with an external fire extinguishing device of the Bambi Bucket "BB4453" type.*

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ТИПОВ ПОЛЕТ НА ХЕЛИКОПТЕР AS532AL COUGAR ЗА ГАСЕНЕ НА ПОЖАРИ С ВЪНШНО ПОЖАРОГАСИТЕЛНО УСТРОЙСТВО ОТ ТИПА "BAMBI BUCKET BB4453"

Николай Загорски

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: nzagorski@space.bas.bg

Ключови думи: *хеликоптер, външно пожарогасително устройство, аеродинамични характеристики*

Резюме: *В настоящия материал е представен аналитично описание на модела на хеликоптер с външно пожарогасително устройство в полет за гасене на пожари. Изследванията са свързани с използваните за тази цел хеликоптери от Военновъздушните сили на Република България AS532AL Cougar с външно пожарогасително устройство от типа Bambi Bucket "BB4453".*

Introduction

The mathematical description of each object must ensure the implementation of the basic principles of mathematical models [1] and have all the necessary elements of the model [2]. In order to fulfill the task of mathematical description of the flight of an aircraft, the main principle is considered to be the consistency and adequacy of the obtained results, which requires that the conditions of applicability of the model be formulated with the utmost precision and that laws and regularities be used by scientific theory and practice over time. In this way, the necessary elements of the model receive completely clear and specific boundaries: a description of the basic assumptions and a closed mathematical description, including the equations of motion, the equations of the relationships between the elements, the numerical and functional characteristics of the aircraft and its control system.

Mathematical description of the type flight model of an AS532AL Cougar helicopter with an external fire extinguishing device for extinguishing fires

The central element of the model should be a system of equations of motion derived from the basic theorems of rigid body dynamics and kinematic relations [3]. In this paper, a system is considered that includes an AS532AL Cougar helicopter and an external fire extinguishing device of the “Bambi Bucket BB4453” type [4]. At the same time, the “Helicopter–External Fire Extinguishing Device” system is a very complex system and goes beyond the concept of a rigid body, which requires the compilation of several additional relations that depend to a significant extent on the assumptions made. For this reason, it is necessary to formulate the basic assumptions for the considered objects and their states at the very beginning, taking as a basis the need for solving the most important practical problems:

- the helicopter with one main propeller and one tail (stabilizing) propeller AS532AL Cougar is assumed in the description as an absolutely rigid body;
- the external fire extinguishing device “Bambi Bucket BB4453” with the so-called “spider web”, consisting of 24 short ropes (considered to be massless, absolutely rigid and inelastic in all directions) is assumed to be an absolutely rigid body;
- the attachment of “BB4453” to the AS532AL Cougar helicopter is carried out with a central cable, which is also assumed to be absolutely rigid and inelastic in all directions. The central cable is attached at one point to the “spider web” (24 short ropes), and the attachment at these two points is assumed to be performed using an ideal spherical joint. This allows, when describing the interaction of “Bambi Bucket BB4453” with the helicopter, to take into account only the tension force of the central cable;
- the aerodynamic characteristics of the helicopter, the characteristics of the forces and moments of its propellers, the characteristics of its control system, are considered to be set by the designer/manufacturer;
- the aerodynamic characteristics of the external fire extinguishing device are considered to be known;
- the mass and moments of inertia of the helicopter and the external fire extinguishing device remain known and constant in the considered time intervals.

Diagram of forces and moments acting in the “Helicopter–External Fire Extinguishing Device” system

Fig. 1 presents a diagram of the forces and moments acting in the “Helicopter–External Fire Extinguishing Device” system. It adopts the following notations:

r_{TP} – radius vector from the origin of the associated coordinate system to the point of application of the forces and moments from the tail propeller thrust;

r_{cc} – radius vector from the origin of the connected coordinate system at the point of attachment of the central cable to the helicopter;

r_{sw} – radius vector from the point of attachment of the central cable of the helicopter to the point of attachment of the cable to the end of the "spider web";

r_{ed} – radius vector from the center of mass of the “Bambi Bucket BB4453” at the point of attachment of the device to the end of the “spider web”;

P_{MP} – thrust of the main propeller;

P_{TP} – tail propeller thrust;

M_{MP} – moment of thrust of the main propeller;

M_{TP} – moment of the tail propeller thrust;

$M.g$ – helicopter weight;

M – mass of the helicopter;

m_{ed} – mass of the external fire extinguishing device;

$m_{ed}.g$ – weight of the external fire extinguishing device;

R_A – aerodynamic force acting on the helicopter;

$R_{A.ed}$ – aerodynamic force acting on the external fire extinguishing device;

M – aerodynamic moment acting on the helicopter;

M_{ed} – aerodynamic moment acting on the external fire extinguishing device;

T – tension force of the central cable of the external fire extinguishing device.

V – helicopter ground speed vector;

V_{ed} – ground speed vector of the external fire extinguishing device;

ω – angular velocity vector of the helicopter;

ω_{ed} – angular velocity vector of the external fire extinguishing device;

$$I_A = \begin{vmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{vmatrix}$$ – helicopter inertia tensor;

$$I_{A.ed} = \begin{vmatrix} I_{x.ed} & -I_{xy.ed} & -I_{xz.ed} \\ -I_{xy.ed} & I_{y.ed} & -I_{yz.ed} \\ -I_{xz.ed} & -I_{yz.ed} & I_{z.ed} \end{vmatrix}$$ – tensor of inertia of the external fire extinguishing device.

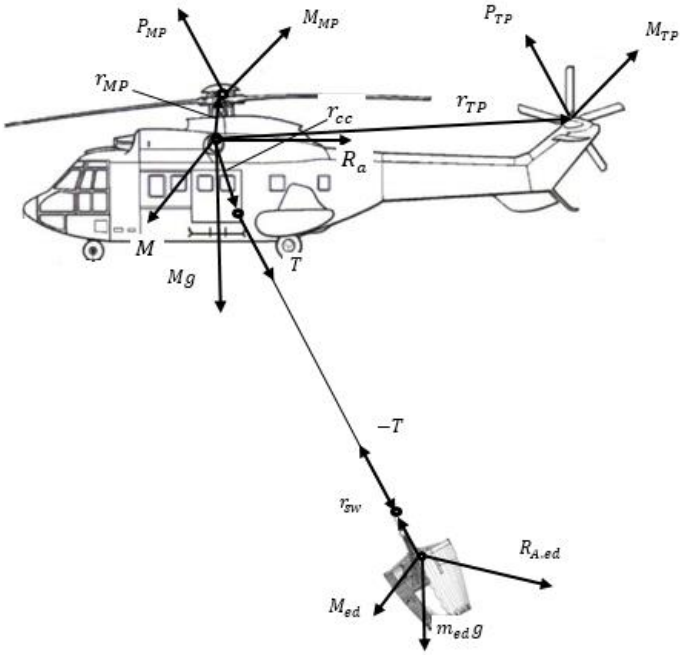


Fig. 1. Diagram of forces and moments acting in the system "Helicopter–External fire extinguishing device"

Within the framework of the assumptions made above, the complete system of differential equations for the motion of the helicopter with the external fire extinguishing device in vector form can include the following equations:

- force equation for the helicopter:

(1) $M\frac{dV}{dt} = P_{MP} + P_{TP} + R_A + Mg + T$;

- equation of moments for the helicopter:

(2) $I_A\frac{d\omega}{dt} = M_{MP} + M_{TP} + M + r_{MP}\,\mathrm{x}\,P_{MP} + r_{TP}\,\mathrm{x}\,P_{TP} + r_{sw}\,\mathrm{x}\,T$;

- equation of the kinematic relationships of the linear velocities of the center of mass of the helicopter:

(3) $\frac{d\rho}{dt} = V_{sw}$,

where ρ is the position vector of the helicopter's center of mass relative to the ground;

- equation of forces of the external fire extinguishing device:

(4) $m\frac{dV_{ed}}{dt} = R_{A.ed} + mg - T$;

- equation of moments for the external fire extinguishing device:

(5) $I_{A.ed}\frac{d\omega_{ed}}{dt} = M_{ed} - r_{ed}\,\mathrm{x}\,T$;

- equation of the kinematic relationships of the linear velocities of the center of mass of the external fire extinguishing device:

(6) $\frac{d\rho_{ed}}{dt} = V_{sw}$,

where ρ_{ed} is the position vector of the center of mass of the external fire extinguishing device relative to the ground surface;

- the kinematic conditions for the vectors r_{MP}, r_{TP}, r_{sw}, r_{ed}, which are constant in length (their variation is completely determined by the vectors ω and ω_{ed}:

(7) $\frac{dr_{MP}}{dt} = \omega \text{ x } r_{MP}$,

(8) $\frac{dr_{TP}}{dt} = \omega \text{ x } r_{TP}$,

(9) $\frac{dr_{sw}}{dt} = \omega \text{ x } r_{sw}$,

(10) $\frac{dr_{ed}}{dt} = \omega \text{ x } r_{ed}$.

Thus, the system of 10 vector differential equations determines 10 vectors: V, V_{ed}, ω, ω_{ed}, r_{MP}, r_{TP}, r_{sw}, r_{ed}, ρ, ρ_{ed}, if additional relations are given that determine [5, 6]:

- the forces and moments of the helicopter propeller thrust;
- the aerodynamic forces and moments of the helicopter and the external fire extinguishing device;
- the masses and moments of inertia of the helicopter and the external fire extinguishing device;
- the tension force of the central cable for the external fire extinguishing device.

To determine the forces and moments of the helicopter propeller thrust using systems of equations during the flight process, it is necessary to know not only the linear but also the angular coordinates, i.e. the orientation of the helicopter and the external fire extinguishing device. Therefore, the following equations must be added to the mathematical description for the calculations:

- the equation for the kinematic relationships between the angular velocities of the helicopter:

(11) $\frac{d\Phi}{dt} = \omega$,

where $\Phi = \{\vartheta, \gamma, \psi\}$ – the helicopter's angular orientation vector;

- the equation for the kinematic relationships between the angular velocities of the external fire extinguishing device:

(12) $\frac{d\Phi_{ed}}{dt} = \omega_{ed}$,

where $\Phi_{ed} = \{\vartheta_{ed}, \gamma_{ed}, \psi_{ed}\}$ – vector of the angular orientation of the external fire extinguishing device.

Depending on these coordinates, as well as on the angular velocities, at any moment of the flight time the necessary forces and moments of the helicopter propellers can be set. This is achieved with the help of the piloting model (of the control actions of the human from the flight crew, or from the autopilot from the control system), which set deviations in the controls depending on the current necessary and available needs, set as a function of the type $f(\rho, \rho_{ed}, V, V_{ed}, \Phi, \Phi_{ed}, \omega, \omega_{ed})$.

To determine the aerodynamic forces and moments of the helicopter and the external fire extinguishing device, it is necessary to know their aerodynamic characteristics. The assumption was made above that they are set by the designer/manufacturer of the equipment. However, since the coefficients of the aerodynamic forces and moments depend on the angles of attack and glide, their determination must also be added when determining the mathematical description. This is done immediately after determining these angles [7]. For this purpose, the components of the velocity vector in the associated coordinate system, in which the force equations are usually integrated, are used:

(13) $\alpha = arctg \frac{-V_{sw.y} + W_y}{V_{sw.x} - W_x}$,

(14) $\beta = arsin \frac{V_{sw.x} - W_x}{|V_{sw} - W|}$.

Formula (13) and Formula (14) allow the wind speed vector W to be taken into account, as it is added to each component of the speed vector.

According to the assumptions made, the masses and moments of inertia of the helicopter and the external fire extinguishing device are assumed to be known and constant.

The tension force in the central cable cannot be determined by direct differential equations. In this case, it is necessary to use algebraic relations for the type of connections existing in the mechanical system under study. Such are the relations between the central cable and the tension force in it:

- geometric condition for the central cable of the external fire extinguishing device:

(15) $r_{cc} = \rho_{ed} - \rho - r_{sw} + r_{ed}$;

- condition for constancy of the length of the central cable (in scalar form):

(16) $|r_{cc}| = |r_{cc.0}|$;

- condition for collinearity of the central cable and the tension force in it (two scalars):

(17) $\frac{r_{cc.x}}{T_x} = \frac{r_{cc.y}}{T_y} = \frac{r_{cc.z}}{T_z}$.

Conclusion

In the algorithm for mathematical description discussed above, it is necessary to select the value of the modulus of the central cable tension force vector $|T|$ in several successive iteration cycles in such a way that condition (16) is fulfilled. Since the relation (15) – (17) contains six equations for six components of the two vectors r_{cc} and T, since the general system of equations is closed [7], the mathematical description of the helicopter flight model with the external fire extinguishing device is complete.

References:

1. Ventzel E. S., Probability Theory: a textbook for universities/E. S. Ventzel. – 11th ed., reprinted. – Moscow: Knorus, 2016. – 658 p.: ill., diagrams – ISBN 978-5-406-00476-0 (in Russian language)
2. Gmurman V. E., Probability Theory and Mathematical Statistics: Textbook for Universities / V. E. Gmurman – 12th ed. – Moscow: Yurait Publishing House, 2022. 479 p. ISBN 978-5-534-00211-9 (in Russian language)
3. Zagorski, N. Izsledvane na oscillations na physically mahalo with a moving point on the okachvane. XI international scientific conference “Teach research, technology and innovation – the basis for citizens on new selective abilities”, June 2-3, 2022, gr. Plovdiv, Bulgarian Defence Institute, Collection of reports, pp. I-74 – I-81. ISSN 1312-2916 (in Bulgarian language)
4. SEI Industries LTD. | Engineered Solutions. www.sei-ind.com /product-families.
5. Emergency situations of space flights (Mathematical modeling. Applied aspects) / A.V. Aleshin, D.K. Dedkov, B.I. Kryuchkov, A.D. Rudchenko, Yu.B. – Star City. Russian State Research Institute for Testing. Cosmonaut Training Center, 1998. – 244 p. (in Russian language)
6. Zagorski, N. Safety of flying a helicopter with an external fire extinguishing device and the influence on the parameters of the device and any balancing characteristics of the helicopter. Year-long international scientific conference at VVVU “G. Benkowski”, Dolna Mitropolia, 2022, ISSN: 2738-716X, pp. 26–32 (in Bulgarian language)
7. Lebedev A.N. Modeling in scientific and technical research. – M.: Radio and Communications, 1989. – 224 p. (in Russian language)

ANALYSIS OF AIRCRAFT TECHNICAL OPERATION PROCESSES USING MARKOV PROCESSES AND CHAINS

Nikolay Zagorski

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: nzagorski@space.bas.bg

Keywords: *mathematical models, processes and systems, technical operations, Markov chains*

Abstract: *A technical operation of the aircraft and its avionics is investigated as a process with the successions of states of operation. The models of the processes and systems of technical operations of avionics in the form of stationary and nonstationary Markov chains of the first and higher order are proposed. There are examples of the processes for two states of operation – able to work and disabled states.*

АНАЛИЗ НА ПРОЦЕСИТЕ НА ТЕХНИЧЕСКА ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА ВЪЗДУХОПЛАВАТЕЛНИ СРЕДСТВА С ИЗПОЛЗВАНЕ НА ПРОЦЕСИ И ВЕРИГИ НА МАРКОВ

Николай Загорски

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: nzagorski@space.bas.bg

Ключови думи: *математически модели, процеси и системи, технически операции, вериги на Марков*

Резюме: *Техническата експлоатация на въздухоплавателните средства и тяхната авионика се разглежда като процес, включващ последователност от експлоатационни състояния. Предложени са модели на процесите и системите за техническа експлоатация на авиониката под формата на стационарни и нестационарни вериги на Марков от първи и по-висок ред. Разгледани са примери за процеси с две експлоатационни състояния – състояние на изправност и състояние на неизправност.*

Introduction

The operation of any aircraft involves the constant impact of various factors on its components, leading to random or systematic changes in their technical condition. Markov processes are a specific type of stochastic process occurring during aircraft operation. The clear link between the reliability characteristics of these systems and the costs associated with their restoration enables the application of Markov process analysis to the management of aircraft operational maintainability. Managing operational maintainability using Markov chains involves determining the optimal maintenance and repair strategy (or course of action) for each state of the asset, thereby minimizing operational costs. This is particularly relevant to the avionics systems of 4+ and 4++ generation aircraft and helicopters.

Models of Technical Operation Processes and Systems

In a broad sense, avionics can be understood as a field of engineering science concerned with the development, manufacture, and operation of aviation electronic and automatic equipment.

In a narrow sense, avionics can be understood as on-board electronic equipment that is, any electronic device (including its electrical components) intended for use on board an aircraft, such as radio-electronic equipment, automatic flight control systems, and instrumentation. This definition of avionics is provided in ICAO manuals [1]. An analysis of the structure of modern avionics systems

and systems in civil aviation aircraft is presented in [2]. The fundamentals of the theory regarding the technical operation of flight and navigation equipment (FNE) – an integral part of avionics – are described in [3].

The system for the technical operation of aircraft avionics comprises the technical assets and equipment, maintenance and repair programs, and the personnel who execute procedures and organize the processes involved in the technical operation of the avionics.

The quality of the technical operation system manifests itself at all stages of the technical operation process and comprises a complex of processes involving intended use, operational monitoring, maintenance, restoration, and repair.

The technical operation of an aircraft and its avionics can be viewed as a process involving sequential changes in operational states. During intended use, these states can be categorized as functional, serviceable, unserviceable, and non-functional. Monitoring avionics operational states encompasses pre-flight and post-flight checks, in-flight monitoring, and the assessment of removed equipment to determine whether components are operational, serviceable, non-functional, or defective. Similarly, distinctions can be made regarding operational and periodic maintenance states, as well as corrective and preventive restoration and repair. When analyzing these processes in real time, it is necessary to take into account states of readiness, downtime, and storage.

The maintenance process viewed as a sequence of changing maintenance states unfolds over time under the influence of numerous factors, both random and non-random. These include the occurrence of failures and malfunctions, the quality of maintenance and repair, the reliability of monitoring equipment, the availability of spare parts, and so on. Transitions between maintenance states occur at both random and deterministic points in time. Such transitions are driven by event streams (e.g., streams of failures, repairs, inspection procedures, etc.). Thus, the maintenance process can be modeled as a stochastic process defined over a set of operational states, characterized by transition probabilities. This enables the analysis of avionics processes and systems by leveraging the well-established framework of stochastic process theory.

By its very nature, the avionics process is a controlled one. The potential for intervention in this process is both objectively deterministic governed by the operating manual and the avionics maintenance and repair program and subjectively random, resulting from unauthorized or erroneous actions by flight and engineering personnel.

A Markov chain is a discrete-time stochastic process characterized by the complete or partial independence of its transitions from the past. The simplest such chain is a first-order stationary Markov chain, in which transitions are independent of both past transitions and time. Another type is the first-order non-stationary Markov chain, where transitions are independent of past transitions but depend on time. Higher-order chains whose transitions depend partially or entirely on previous ones represent a generalization of stationary Markov chains. The most complex objects in Markov chain theory are non-stationary higher-order chains, where transitions depend on both previous transitions and the specific points in time at which those transitions occurred. Thus, four basic types of Markov chains are defined.

Markov chains as a model of technical operation processes

How can technical operation processes be defined as Markov chains? The description of Markov chains begins with defining the set of states, $\boldsymbol{S}$. In the general case, this set may be countable. Here, however, we will limit ourselves to considering a set $\boldsymbol{S}$ consisting of $\boldsymbol{n}$ states:

(1) $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_j, \dots, S_n\}$.

At the initial time instant $[l = 0]$, the probability distribution of the states must be specified:

(2) $P^{(0)} = \left\{P_1^{(0)}, P_2^{(0)}, \dots, P_i^{(0)}, \dots, P_j^{(0)}, \dots, P_n^{(0)}\right\}$,

provided it is valid $\sum_{i=1}^{n} P_i^{(0)} = 1$.

The superscript index in parentheses will denote time instants. In the special case, $P^{(0)}$ represents a degenerate unit vector - that is, a vector that ought to be a unit vector but is a zero vector and cannot be normalized:

(3) $P^{(0)} = \{0,0, \dots, l, \dots,0\}$.

If, at a given time l, the chain is in state $S_i \in S$, then the next change (value) of the stationary Markov chain is determined by the transition probability matrix

(4) $P_l^S = \{p(S_j/S_i), S_j, S_i \in S\}$,

whose elements depend solely on the current state of S_i and do not depend on previous changes or the time instant l. Thus, a stationary Markov chain of order l is defined, representing the set

(5) $\xi_1^S = \{S, P^{(0)}, P_l^S\}$.

The dynamics of stationary Markov chains of the type ξ_l^S are described as follows:

(6) $h_{\xi_1^S}(m) = S_{i_0}^{(0)}, S_{i_1}^{(1)}, \dots, S_{i_m}^{(m)}$.

The step number of the Markov chain serves as a time parameter. The expression $S_{i_m}^{(m)}$ denotes the state of the chain $S_{i_0} \epsilon S$ at time m. The realization of the stationary Markov chain $h_{\xi_1^S}(m)$ corresponds to the probability:

(7) $P\left\{h_{\xi_l^S}(m)\right\} = P_{i_0}^{(0)} p\left(S_{i_1}^{(1)}/S_{i_0}^{(0)}\right) \dots p\left(S_{i_m}^{(m)}/S_{i_{m-1}}^{(m-1)}\right)$.

Let us denote by $p^{(m)}\left(S_j/S_i\right)$ the conditional probability that the stationary Markov chain enters state S_j at the m-th step, given that the initial state was S_i. It is equal to the sum of the probabilities of all realizations of length m that start at S_i and end at S_j. Specifically, $p^{(1)}\left(S_j/S_i\right) = p\left(S_j/S_i\right)$:

(8) $p^{(2)}\left(S_j/S_i\right) = \sum_{k=1}^{n} p(S_k/S_i) p\left(S_j/S_k\right)$.

By induction, the general Kolmogorov-Chapman recurrence formula for homogeneous Markov stochastic processes is obtained:

(9) $p^{(m)}\left(S_j/S_i\right) = \sum_{k=1}^{n} p^{(l)}(S_k/S_i)\, p^{(m-1)}\left(S_j/S_i\right)$.

Equation (9) reflects the fact that the first l steps bring the stationary Markov chain to state S_k, and the probability of the subsequent transition from S_k to S_j does not depend on the way the process reached state S_k.

It follows from equation (9) that the unconditional probability of reaching state S_j at step m can be determined using the following recurrence formula:

(10) $P^{(m)}\left(S_j\right) = \sum_{k=1}^{n} P^{(0)}\,(S_k) p^{(m)}\left(S_j/S_k\right)$.

State S_j is reachable from state S_i if there exists a value $m \geq 0$ such that $p^{(m)}\left(S_j/S_k\right) > 0$ – that is, if there is a positive probability of transitioning from state S_i to state S_j. A Markov chain is irreducible when every state is reachable from every other state. Let $f^{(m)}\left(S_j/S_k\right)$ denote the probability that, starting from state S_i, the first occurrence of state S_j takes place after m steps. If we set $f^{(0)}\left(S_j/S_i\right) = 0$, then

(11) $f^{(\infty)}\left(S_j/S_i\right) = \sum_{l=1}^{\infty} f^{(l)}\left(S_j/S_i\right)$.

The probability $f^{(\infty)}\left(S_j/S_i\right)$ represents the probability that, starting from state S_i, the process will at some point transition to state S_j.

To calculate the probability $f^{(\infty)}\left(S_j/S_i\right)$, the following reasoning is applied. If the first arrival at state S_j occurs at transition l, where $(1 \leq l \leq m-1)$, then the conditional probability of reaching state S_j at transition m will be equal to $p^{(m)}\left(S_j/S_i\right)$. Taking into account that $p^{(0)}\left(S_j/S_i\right) = 1$, we obtain

(12) $p^{(m)}\left(S_j/S_i\right) = \sum_{l=1}^{m} f^{(1)}\left(S_j/S_i\right) p^{(m-1)}\left(S_j/S_i\right)$.

In an iterative cycle, by successively assigning values to the transition indices $l = 1,2,\dots,n$, values for $p^{(l)}\left(S_j/S_i\right)$ are obtained via formula (12); when substituted into (11), these allow for the determination of results for $f^{l}\left(S_j/S_i\right)$ for values of $l = \overline{1,m}$.

Then, the mean return time of the process $\mu\left(S_j\right)$ to state S_j can be determined by the following expression:

(13) $\mu\left(S_j\right) = \sum_{l=1}^{\infty} l f^{(l)}\left(S_j/S_i\right)$.

A state S_i is recurrent if $f^{(\infty)}\left(S_j/S_i\right) = 1$, and is non-recurrent if $f^{(\infty)}\left(S_j/S_i\right) < 1$. A state S_j has period $t > 1$, if $p^{(m)}\left(S_j/S_i\right) = 0$, where m is not a multiple of t and t is the largest integer with this property. A state S_j is non-periodic if no such $t > 1$ exists. A non-periodic recurrent state S_j for which $\mu\left(S_j\right) < \infty$ is an ergodic state.

In an irreducible ergodic chain, there exist limits that do not depend on the initial state S_j. These limits are defined as:

(14) $\pi\left(S_j\right) = lim\, p^{(m)}\left(S_j/S_i\right)$,

as $\pi\left(S_j\right) > 0$ and

(15) $\pi\left(S_j\right) = \sum_{i=1}^{n} \pi(S_i)\, p\,\left(S_j/S_i\right)$, for $S_j \in S$,

where $\sum_{i=1}^{n} \pi(S_i) = 1$ and $\mu\left(S_j\right) = 1/\pi\left(S_j\right)$.

For a non-stationary Markov chain, the transition probability matrix takes the following form:

(16) $\mathfrak{R}_l^{NS} = \{P_l^{NS}, l = \overline{0,m}\}$,

where $P_l^{NS} = \{p(S_j/S_i, l), S_i, S_j \in S\}$ are matrices whose elements depend on the time instant l.

Thus, the non-stationary Markov chain of order 1 is written as

(17) $\xi_l^{NS} = \{S, P^{(0)}, \mathfrak{R}_l^{NS}\}$.

The flow of processes in stationary Markov chains of the form $h_{\xi_l^S}(m)$ corresponds to a probability

(18) $P\{h_{\xi_l^{NS}}(m)\} = P_{i_0}^{(0)} p(S_{i_1}^{(1)}/S_{i_0}^{(0)}, 0) \dots p(S_{i_m}^{(m)}/S_{i_{m-1}}^{(m-1)}, m-1)$.

The conditional probability $p^{(m)}(S_j/S_i, m)$ for the non-stationary Markov chain to fall into state S_j at the next m step, given that the initial state of the process was S_i, is equal to the sum of the probabilities of all realized states for the time period m, starting from state S_i and ending in state S_j:

(19) $p^{(1)}(S_j/S_i, 1) = p(S_j/S_i, 1)$;
$p^{(2)}(S_j/S_i, 2) = \sum_{i=1}^n p^{(1)}(S_k/S_i, 1)\, p(S_j/S_k, 2)$.

Then, by induction, the general Kolmogorov-Chapman recurrence formula for a nonstationary Markov chain is derived:

(20) $p^{(m)}(S_j/S_i, m) = \sum_{k=1}^n p^{(1)}(S_k/S_i, 1)\, p^{(m-1)}(S_j/S_k, m-1)$.

The unconditional probability of reaching the non-stationary Markov process in state S_j after executing m steps is determined as follows:

(21) $p^{(m)}(S_j, m) = \sum_{k=1}^n p^{(0)}(S_k, 1)\, p^{(m)}(S_j/S_k, m)$.

If $f^{(m)}(S_j/S_i, m)$ denotes the probability that starting from the initial state S_i the non-stationary Markov process will reach state S_j after exactly m number of steps. To calculate this probability, by analogy with stationary Markov chains, formula (12) can be used, and we will obtain:

(22) $p^{(m)}(S_j/S_i, m) = \sum_{k=1}^n f^{(1)}(S_j/S_i, 1)\, p^{(m-1)}(S_j/S_k, m-1)$.

Then the average time for the non-stationary process $\mu_{\mathfrak{R}_l^{NS}}(S_j)$ to return to state S_j can be determined as follows:

(23) $\mu_{\mathfrak{R}_l^{NS}}(S_j) = \sum_{l=1}^{\infty} l f^{(l)}(S_j/S_i, l)$.

Consider a stationary Markov chain of order k. Such a chain is defined by the following set:

(24) $\xi_k^S = \{S, P^{(0)}, \mathfrak{R}_k^S\}$,

where $\mathfrak{R}_k^S = \{P_l^S, l = \overline{1,k}\}$ is the set of transition state matrices from row l to row k. The elements of these matrices are defined as follows:

(25) $P_l^S = \{p(S_{i_l}/S_{i_{l-1}}), S_{i_l}, S_{i_{l-1}}, S_{i_0} \in S\}$

and depend on the previous l states.

The realization of $h_{\xi_k^S}(m)$ corresponds to the probability

(26) $P\{h_{\xi_k^S}(m)\} = P_{i_0}^{(1)} p(S_{i_1}^{(1)}/S_{i_0}^{(0)}) \dots p(S_{i_k}^{(k)}/S_{i_{k-1}}^{(k-1)}, \dots, S_{i_0}^{(0)}) \dots p(S_{i_m}^{(m)}/S_{i_{m-1}}^{(m-1)}, \dots, S_{i_{m-k}}^{(m-k)})$.

Let $p^{(m)}(S_{i_m}/S_{i_{m-1}}, \dots, S_{i_{m-k}})$ denote the conditional probability of a Stationary Markov Chain entering state S_{i_m} after m-number of steps, if the initial state at time instant $(m-k)$ was $S_{i_{m-k}}$. Then we can write:

(27)
$p^{(1)}(S_j/S_i) = p(S_{i_1}/S_{i_0})$;
$p^{(2)}(S_{i_2}/S_{i_1}, S_{i_0}) = \sum_{i_1=1}^n p^{(1)}(S_{i_1}/S_{i_0}) p(S_{i_2}/S_{i_1}, S_{i_0})$;
...
$p^{(k)}(S_{i_k}/S_{i_{k-1}}, \dots, S_{i_0}) = \sum_{i_{k-1}=1}^n p^{(k-1)}(S_{i_k}/S_{i_{k-1}}, \dots, S_{i_0}) p(S_{i_k}/S_{i_{k-1}}, \dots, S_{i_0})$;
...
$p^{(m)}(S_{i_m}/S_{i_{m-1}}, \dots, S_{i_{m-k}}) = \sum_{i_{m-1}=1}^n p^{(m-1)}(S_{i_{m-1}}/S_{i_{m-2}}, \dots, S_{i_{m-k}}) p(S_{i_{m-1}}/S_{i_{m-2}}, \dots, S_{i_{m-k}})$.

If $m = k$, a non-stationary Markov chain will be obtained, the transitions in which will depend on all previous transitions.

From (27) it follows that the unconditional probability of entering state S_{i_m} at m consecutive steps with number m can be determined using the recurrence formula:

(28) $p^{(m)}(S_{i_m}) = \sum_{i_0=1}^n P^{(0)}(S_{i_0}) p^{(m)}(S_{i_m}/S_{i_{m-1}}, \dots, S_{i_0})$.

If from an initial state S_{i_0} we express with $f^{(m)}\left(S_{i_m}/S_{i_{m-1}},\dots,S_{i_0}\right)$ the probability of first entering state S_{i_m} at step m. The expression is valid for this probability:

(29) $f^{(m)}\left(S_{i_m}/S_{i_{m-1}},\dots,S_{i_0}\right)=\sum_{l=1}^{n}f^{(l)}\left(S_{i_m}/S_{i_{m-1}},\dots,S_{i_0}\right)p^{(m-l)}\left(S_{i_m}/S_{i_{m-1}},\dots,S_{i_0}\right)$.

Then the average return time of $\mu_{\xi_l^{NS}}(S_i)$ of the high-order stationary Markov chain to state S_i is determined as follows:

(30) $\mu_{\xi_l^{NS}}(S_i)=\sum_{l=1}^{\infty}lf^{(l)}\left(S_{i_l}/S_{i_{l-1}},\dots,S_{i_{l-k}}\right)$.

Next, let's consider a non-stationary Markov chain of order k. It is defined by the following set:

(31) $\xi_k^{NS}=\left\{S,P^{(0)},\Re_k^{NS}(l)\right\}$,

where $\Re_k^{NS}=\left\{P_r^{NS}(l),\ l=\overline{1,m},\ r=\overline{1,k}\right\}$ is a set of transition probability matrices from l-th to k-th order, the elements of which depend on the previous k states and on the time instant l:

(32) $P_r^{NS}(l)=\left\{p\left(S_{i_k}/S_{i_{k-1}},l_{k-1},\dots,S_{i_0},l_0\right),S_{i_k},S_{i_{k-1}},\dots,S_{i_0}\in S\right\}$.

The realization $h_{\xi_k^{NS}}(m)$ of a high-order nonstationary Markov chain corresponds to a probability

(33) $$P\left\{h_{\xi_k^{NS}}(m)\right\}=P_{i_0}^{(0)}p\left(S_{i_1}/S_{i_0},0\right)\dots p\left[S_{i_k}^{(k)}/S_{i_{k-1}}^{(k-1)},(k-1),\dots,S_{i_0}^{(0)},0\right]\dots$$
$$\dots p\left[S_{i_m}^{(m)}/S_{i_{m-1}}^{(m-1)},(m-1),\dots,S_{i_{m-k}}^{(m-k)},(m-k)\right].$$

In this way, the main types of Markov chains were examined as models of the processes of technical operation of aircraft avionics.

Stationary Markov chain model of the technical operation process

The determination of the analytical functions of the failure intensity and the probability of failure-free operation of avionics based on statistical data is shown in work [3]. As is known, objects of technical operation in aviation can be in two states: S_1 – operational state for use as intended, and S_2 – inoperative state, in which the operational state is restored.

At time $l=0$ the object is in state S_2, i.e. $P^{(0)}=(0,1)$. The transition probability matrix is written in the following form:

$P_l^S=\begin{bmatrix}0{,}99 & 0{,}01\\ 1 & 0\end{bmatrix}$.

The probability of the object falling into states S_1 and S_2 in four steps can be determined as follows:

$p^{(1)}(S_1/S_2)=1;$
$p^{(1)}(S_2/S_2)=0;$
$p^{(2)}(S_1/S_2)=p^{(1)}(S_1/S_2)p(S_1/S_2)+p^{(1)}(S_2/S_2)p(S_1/S_2)=0{,}99;$
$p^{(2)}(S_2/S_2)=p^{(1)}(S_1/S_2)p(S_1/S_2)+p^{(1)}(S_2/S_2)p(S_2/S_2)=0{,}01;$
$p^{(3)}(S_1/S_2)=p^{(2)}(S_1/S_2)p(S_1/S_2)+p^{(2)}(S_2/S_2)p(S_1/S_2)=0{,}9901;$
$p^{(3)}(S_2/S_2)=p^{(2)}(S_1/S_2)p(S_1/S_2)+p^{(2)}(S_2/S_2)p(S_2/S_2)=0{,}0099;$
$p^{(4)}(S_1/S_2)=p^{(3)}(S_1/S_2)p(S_1/S_2)+p^{(3)}(S_2/S_2)p(S_1/S_2)=0{,}990099;$
$p^{(4)}(S_2/S_2)=p^{(3)}(S_1/S_2)p(S_1/S_2)+p^{(3)}(S_2/S_2)p(S_2/S_2)=0{,}009901.$

The unconditional probability of the object falling into states S_1 and S_2 in four steps can be determined as follows:

$p^{(1)}(S_1)=p^{(0)}(S_1)p(S_1/S_1)+p^{(0)}(S_2)p(S_1/S_2)=1;$
$p^{(1)}(S_2)=0;$
$p^{(2)}(S_1)=p^{(1)}(S_1)p(S_1/S_1)+p^{(1)}(S_2)p(S_1/S_2)=0{,}99;$
$p^{(2)}(S_2)=0{,}01;$
$p^{(3)}(S_1)=p^{(2)}(S_1)p(S_1/S_1)+p^{(2)}(S_2)p(S_1/S_2)=0{,}9901;$
$p^{(3)}(S_2)=0{,}0099;$
$p^{(4)}(S_1)=p^{(3)}(S_1)p(S_1/S_1)+p^{(3)}(S_2)p(S_1/S_2)=0{,}990099;$
$p^{(4)}(S_2)=0{,}009901.$

The probability of an event in which, starting from the initial state S_2, the object will first enter state S_2 between the first and fourth steps is determined as follows:

$f^{(1)}(S_2/S_2)=\frac{p^{(1)}(S_2/S_2)}{p^{(0)}(S_2/S_2)}=0;$
$f^{(2)}(S_2/S_2)=\frac{p^{(2)}(S_2/S_2)-f^{(1)}(S_2/S_2)p^{(1)}(S_2/S_2)}{p^{(0)}(S_2/S_2)}=0{,}01;$
$f^{(3)}(S_2/S_2)=\frac{\{p^{(3)}(S_2/S_2)-f^{(1)}(S_2/S_2)p^{(2)}(S_2/S_2)-f^{(2)}(S_2/S_2)p^{(1)}(S_2/S_2)\}}{p^{(0)}(S_2/S_2)}=0{,}0099;$
$f^{(4)}(S_2/S_2)=\frac{\{p^{(4)}(S_2/S_2)-f^{(1)}(S_2/S_2)p^{(3)}(S_2/S_2)-f^{(2)}(S_2/S_2)p^{(2)}(S_2/S_2)-f^{(3)}(S_2/S_2)p^{(1)}(S_2/S_2)\}}{p^{(0)}(S_2/S_2)}=0{,}009801.$

The average time for the object to return to state S_2 is determined by formula (13):

$$\mu(S_2) = 1.f^{(1)}(S_2/S_2) + 2.f^{(2)}(S_2/S_2) + 3.f^{(3)}(S_2/S_2) + 4.f^{(1)}(S_2/S_2) =$$

$$= 1.2 + 2.0{,}01 + 3.0{,}0099 + 4.0{,}009801 = 2.0{,}01 + \sum_{l=3}^{\infty} 0{,}99^{(l-1)}\, 0{,}01.$$

The stationary probabilities for states S_1 and S_2 can be determined by formulas (14) and (15):

$\pi(S_1) = \pi(S_1)p(S_1/S_1) + \pi(S_2)p(S_1/S_2)$,

$\pi(S_1) + \pi(S_2) = 1$,

$\pi(S_1) = \pi(S_1)p(S_1/S_1) + [1 - \pi(S_1)]p(S_1/S_2)$,

$\pi(S_1) = \frac{p(S_1/S_1)}{1-p(S_1/S_1)+p(S_1/S_2)} = \frac{1}{1-0{,}99+1} = \frac{1}{1{,}01}0{,}99(0099)$;

$\pi(S_2) = 0{,}00(9901)$.

The average time $\mu(S_2)$ can be determined as follows:

$\mu(S_2) = \frac{1}{\pi(S_2)} = \frac{1}{0{,}00(9901)} \approx 100{,}91$.

Non-stationary Markov chain model of the technical operation process

Let us assume the following form of the transition probability matrix:

$p_1^{NS} = \begin{pmatrix} 0{,}99 & 0{,}01 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$; $\quad p_2^{NS} = \begin{pmatrix} 0{,}98 & 0{,}02 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$;

$p_3^{NS} = \begin{pmatrix} 0{,}97 & 0{,}03 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$; $\quad p_4^{NS} = \begin{pmatrix} 0{,}96 & 0{,}04 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

This shows that the states of the object are described by a non-stationary Markov chain.

The probability of the object falling into states S_1 and S_2 in four steps can be determined as follows:

$p^{(1)}(S_1/S_2\,,1) = 1$;

$p^{(1)}(S_2/S_2\,,1) = 0$;

$p^{(2)}(S_1/S_2\,,2) = p^{(1)}(S_1/S_2\,,1)p(S_1/S_2\,,2) + p^{(1)}(S_2/S_2\,,1) + p(S_1/S_2\,,2) = 0{,}98$.

$p^{(2)}(S_2/S_2\,,2) = 1 - 0{,}98 = 0{,}02$;

$p^{(3)}(S_1/S_2\,,3) = p^{(2)}(S_2/S_2\,,2)p(S_1/S_1\,,3) + p^{(2)}(S_2/S_2\,,2)p(S_1/S_2\,,3) = 0{,}98.0{,}97 + 0{,}2.1 =$

$= 0{,}9706$;

$p^{(3)}(S_2/S_2\,,3) = 1 - 0{,}9706 = 0{,}0294$;

$p^{(4)}(S_1/S_2\,,4) = p^{(3)}(S_2/S_2\,,3)p(S_1/S_1\,,4) + p^{(3)}(S_2/S_2\,,3)p(S_1/S_2\,,4) =$

$= 0{,}9706.0{,}96 + 0{,}0294.1 = 0{,}991176$.

$p^{(4)}(S_2/S_2\,,4) = 1 - p^{(4)}(S_1/S_2\,,4)$.

The probability of an event in which, starting from the initial state S_1, the object will first enter state S_2 between the first and fourth steps is determined as follows:

$f^{(1)}(S_2/S_2\,,1) = \frac{p^{(1)}(S_2/S_2,1)}{p^{(0)}(S_2/S_2,0)} = 0$;

$f^{(2)}(S_2/S_2\,,2) = \frac{p^{(2)}(S_2/S_2,2) - f^{(1)}(S_2/S_2,1)p^{(1)}(S_2/S_2,1)}{p^{(0)}(S_2/S_2,0)} = 0{,}02$;

$f^{(3)}(S_2/S_2\,,3) = \frac{\{p^{(3)}(S_2/S_2,3) - f^{(1)}(S_2/S_2,1)p^{(2)}(S_2/S_2,2) - f^{(2)}(S_2/S_2,2)p^{(1)}(S_2/S_2,1)\}}{p^{(0)}(S_2/S_2,0)} = 0{,}0294$;

$f^{(4)}(S_2/S_2\,,4) = \frac{\{p^{(4)}(S_2/S_2,4) - f^{(1)}(S_2/S_2,1)p^{(3)}(S_2/S_2,3) - f^{(2)}(S_2/S_2,2)p^{(2)}(S_2/S_2,2) - f^{(3)}(S_2/S_2,3)p^{(1)}(S_2/S_2,1)\}}{p^{(0)}(S_2/S_2,0)} =$

$= 0{,}0306$.

The average time for the object to return to state S_2 can be determined by formula (23). In this way, the principle possibility of describing the simplest processes of technical operation of avionics of aviation equipment using Markov processes and chains is shown.

References:

1. ATA Airline Handbook, www.airlines.org/products/AirlineHandbookTable of Contents.
2. Definitions Contained in Convention on International Civil Aviation, the Annexes Thereto and the Procedures for Air Navigation Services First Edition – 1991. ICAO – 9569 – Definitions Contained in the Convention on International Civil Aviation, the Annexes Thereto and the Procedures for Air Navigation Services First Edition – 1991 | GlobalSpec.
3. Vorobyov, V. G., V. P. Zyl, S. V. Kuznetsov, Fundamentals of the Theory of Technical Operation of Flight and Navigation Equipment, Transport, Moscow, 1999, 334 p., ISBN 5-277-02053-5.

ЕНЕРГИЙНИ, ТОПЛИННИ И ВОДНИ РЕСУРСИ НА СИСТЕМИ ЗА ЖИВОТОПОДДЪРЖАНЕ НА ПОВЪРХНОСТТА НА ЛУНАТА И МАРС

Павлин Граматиков

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg

Ключови думи: *Луна, Марс, енергийни ресурси, топлинни ресурси, водни ресурси, биорегенеративни системи за животоподдържане*

Резюме: *Системите за животоподдържане на Луната и Марс зависят от три ресурса: енергия; топлинен контрол и вода. На Луната почти непрекъснатата слънчева радиация в полярните райони за фотоволтаици, а ядрените източници се ползват през 14-дневната лунна нощ. На Марс по-ниската слънчева инсолация и праховите бури налагат използване на фотоволтаици в комбинация с ядрени реактори. Топлинният контрол отстранява температурни разлики средно −63°C на Марс и от −173°C до +127°C на Луната. Воден лед има в полярните кратери на Луната и под повърхността на Марс.*

ENERGY, HEAT AND WATER RESOURCES OF LIFE-SUPPORT SYSTEMS ON THE MOON AND MARS SURFACE

Pavlin Gramatikov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg

Keywords: *Moon, Mars, energy resources, thermal resources, water resources, bioregenerative life-support systems*

Abstract: *Life support systems on the Moon and Mars depend on three resources: energy; heat control and water. On the Moon, the almost continuous solar radiation in the polar regions for photovoltaics, and nuclear sources are used during the 14-day lunar night. On Mars, lower solar insolation and dust storms necessitate the use of photovoltaics in combination with nuclear reactors. Thermal control removes temperature differences averaging −63°C on Mars and from −173°C to +127°C on the Moon. Water ice is found in the polar craters of the Moon and under the surface of Mars.*

Въведение

Темата за енергийните, топлинните и водните ресурси на космически оранжерии на повърхността на Луната и Марс е ключова за дългосрочното присъствие на човека в Космоса. Тези технологии включват събиране на слънчева енергия, топлообмен, топлинно съхранение, термоелектрическо преобразуване и разсейване на топлина. Основните енергийни системи имат модули за производство на електроенергия и модули за съхранение на енергия, всеки от които включва ядрена енергия, горивни клетки и други мултиенергийни източници. Въздухът за космонавтите трябва да е с: температура 20-25°C; относителна влажност 30–60% и налягане 0.75–0.8 atm [7]. Системата за контрол на околната среда и подпомагане на живота (ECLSS) е изкуствена микросреда, която осигурява ресурси за човека при космически изследвания.

На Луната и Марс космическите оранжерии и биорегенеративните системи за животоподдържане са напълно изолирани. Те трябва да осигуряват: храна; кислород и пречистена вода; защита от радиация, микрометеорити и др.

Основните различия между Луната и Марс са:

А) *Луната:* Характерно е: няма атмосфера; има 14-дневни цикли ден/нощ; има екстремални температурни амплитуди от -173°C до +127°C; ниска гравитация (1/6 g) и изобилие от слънчева енергия в двуседмичния ден.

Б) *Марс:* Тази планета има: разредена атмосфера, състояща се главно от CO_2 с налягане 0,6% от земното налягане; прашни бури; сезонни температурни вариации от -125°C до +20°C, по-слаба слънчева радиация (~ 43% от земната) и гравитация 0,38 g.

Енергийни ресурси на Луната:

А) *Слънчева енергия (основен източник):* Има висока интензивност ~ 1360 W/m², но проблемът е 14-дневната нощ. Може да се използват фотоволтаици заедно с акумулаторни батерии, но акумулаторите имат огромна маса. Приложим е енергиен мост – на кратерите има фотоволтаици, а те захранват оранжерията под повърхността.

Б) *Ядрена енергия (резерв/основа):* Компактни реактори, например Kilopower осигуряват 1–10 kW електрически и топлина денонощно. Ядрената енергия е ключова за оцеляване по време на лунната нощ. Възможности за бъдещето е Хелий-3, добиван от лунния реголит за термоядрен синтез, но технологично е далечно приложението.

Енергийни ресурси на Марс:

А) *Слънчева енергия:* По-слаба е от Луната ~ 590 W/m² максимум, често намалявана от прашни бури до < 100 W/m² за седмици. Недостатък е нуждата от големи площи фотоволтаици и почистването им от прах.

Б) *Ядрена енергия*: За Марс това е най-надеждният източник за базово използване и през прашни бури. Може да се ползват малки реактори или радиоизотопни термоелектрически генератори (RTG) с плутоний-238 (238Pu).

В) *Вятърна енергия:* Атмосферата на Марс е разредена с налягане като на 35 km над Земята, вятърът е много слаб, но създава прашни бури. Ефективността е много ниска.

Извод: На Луната ще се разчита на хибрид (слънце + батерии/горивни клетки + ядрен източник за нощта), а на Марс – основно на малък ядрен реактор, допълнен от слънчеви панели.

Топлинни ресурси и терморегулация

На Марс и Луната огромният проблем е задържането на топлина през нощта и отвеждането на излишната топлина през деня.

А) *Луна:* През деня оранжерията се прегрява – нужда от топлинни радиатори и външни рефлектори, отразяващи слънчевата светлина. През нощта е под -150°C. и оранжерията губи топлина чрез инфрачервено излъчване. Решението е дебела топлоизолация (аерогел, реголитни тухли), фазово-променящи се материали (PCM – солен хидрат, който се топи и се втвърдява около 20°C), геотермална маса (кутии с вода). Топлината от ядрения източник се използва за загряване на въздуха или водния кръг.

Б) *Марс:* Цикълът ден/нощ има по-малко екстремни амплитуди, но атмосферата отнема топлина. Прашните бури намаляват слънчевото затопляне и температурата пада. Оранжерията се отоплява с електрически нагреватели или с топлина от реактора.

В) *Терморегулация:* Използване на топлинна помпа – през деня топлината се отвежда към скалите под повърхността, през нощта се извлича обратно. Използва се система за активно топлоуправление с течен кръг (вода/пропиленгликол), който минава през радиатори, топлообменници и подово отопление на оранжерията.

Водни ресурси

Водата е най-ценният ресурс – за пиене, напояване, кислород, защита от радиация.

А) *Луна:* Локални източници са полярните кратери на Луната, например кратер Шумейкър, които съдържат воден лед в постоянна сянка. Температурата е -200°C. Добивът може да е с пробиване, стопяване на леда с електрически нагреватели, събиране на водни пари, пречистване. При затворен цикъл оранжерията ще рециклира > 90% от водата (кондензация от транспирацията на растенията, пречистване на урина и въздух). Ако няма полярен лед (например на екватора) водата трябва да бъде докарана от Земята, което е скъпо. Възможен е добив на вода от реголит (минерали, които съдържат OH^- групи) – енергоемък и с нисък добив.

Б) *Марс:* Локални източници са подповърхностен воден лед (на много места на Марс, на дълбочина 5-50 cm в средните ширини, покрит с реголит, [1]) и хидратирани минерали. Добивът е чрез изкопаване на ледено-реголитна смес, нагряване в херметична камера и кондензация на парите. Това е енергийно умерен метод. Атмосферната влага на Марс има много ниска стойност (абсолютна влажност < 0.1 g/m³), но може да се извлича със сорбционни материали.

В) *Извод:* Марс има леснодостъпна вода в широчини 30-60°. Луната разчита почти изцяло на полярния лед.

Използване на местни ресурси (ISRU) технологии

Добив на кислород

Лунният реголит съдържа около 40–45% кислород под формата на метални оксиди. Има повече от 20 концептуални решения за извличане на кислород от него. Методите включват: карботермална редукция; електролиза на разтопен реголит и редукция с водород.

Електролизата на вода се използва на китайската космическа станция Tiangong и МКС. Обикновено изисква благородни метални катализатори. Проучвания показват, че лунният реголит може да служи като катализатор за електролиза, намалявайки зависимостта от Земята.

Строителни материали

Лунен реголит може да се ползва за 3D принтиране на защитни структури. Реголитът осигурява защита срещу радиация, микрометеорити и екстремални температурни, [1]. Специалисти от SINTEF проучват изграждането на оранжерии от лунен прах

Състав на Марсианска и Лунна оранжерия

Марсианската оранжерия е под земята или е покрита от реголит. Използва се малък ядрен реактор 10 kW и слънчеви панели с 20 kW пикова стойност. Топлинният кръг от реактора загрява воден резервоар. Той поддържа +20°C през нощта. Излишната лятна топлина се отвежда към подземни радиатори. Водата се извлича от местен лед. Растенията (картофи, маруля, соя) се напояват капково. Водата от кондензация на въздуха се връща обратно. Кислородът се добива от електролиза на вода (отпадъчната фракция) или директно от CO_2 на (технология MOXIE) [6].

Полярната лунна оранжерия използва слънчева енергия в продължение на 14 дни и акумулатори (водородни горивни клетки) или ядрена енергия за нощта. Използва се двоен корпус – външен от реголит (изолатор) и вътрешен с водни стени. Стопяването на лед за вода служи и като топлинен акумулатор. Водата се добива от стопен полярен лед.

Енергийни системи за Марс и Луната

А) *Фотоволтаичните клетки*. Те са най-широко разпространеното решение за космически мисии. Конвенционалните силициеви PV клетки имат ефективност около 20%. Клетките от галиев арсенид (GaAs) достигат до 30% ефективност на преобразуване. На Луната, особено в полярните региони близо до кратера Shackleton, има зони с почти непрекъсната слънчева светлина 240 дни в годината, което ги прави идеални за слънчеви енергийни системи.

Б) *Хибридни осветителни системи за оранжерии:* Използват се параболични огледала за събиране на слънчева светлина и оптични влакна за предаването ѝ до оранжерията, допълнени от LED осветление. Проучвания на Германския космически център (DLR) и ESA MELiSSA показват, че хибридната система е предпочитана за лунни оранжерии.

В) *Ядрени енергийни системи:* Радиоизотопните термоелектрически генератори (RTG) са с ефективност под 10%. Стирлинг радиоизотопните генератори (SRG) са по-ефективна генерация. Има системи със затворен цикъл на Brayton (CBC) които: имат високотермична ефективност до 39%; използват свръхкритичен CO_2 или хелий-ксенонова смес като работен флуид и компактна структура и имат високо съотношение мощност/тегло.

Г) *Горивни клетки:* Те преобразуват химическа енергия директно в електричество чрез електрохимични реакции.

Енергийни системи на оранжериите:

А) LED осветление (най-енергоемкият компонент)

Б) Термален контрол и климатизация

В) Помпи и вентилатори за циркулация на въздух и вода

Г) Системи за рециклиране на вода

Д) Контрол на атмосферата (CO_2 инжектиране, филтрация)

Електрическата и термалната връзка с основната база е критична – оранжерията получава енергия от съществуващата инфраструктура на базата. За самоподдържаща се лунна база за 100 души се изискват годишно: 15.16 m^3 за човешки нужди; 88.77 m^3 за селско стопанство (оранжерии) и 2.46 m^3 за технически нужди.

Топливни ресурси на Луната и Марс

Производство на гориво чрез ISRU, [2] може да става от воден лед, като водата може да се електролизира за производство на водород и кислород. Кислородът служи за дишане, а водородът може да се използва като ракетно гориво. На Луната водният лед в полярните региони представлява ключов ресурс за производство на гориво. Атмосферата на Марс е рядка, със средногодишно налягане от около 750 Pa, и се състои от 95,3% CO_2, 2,7% N_2, 1,6% Ar и следи от O_2, CO и H_2O [7]. MOXIE експериментът на NASA произвежда кислород чрез

твърдооксидна електролиза на CO_2 от марсианската атмосфера [7]. Кислородът може да се комбинира с метан за ракетно гориво. Метаново гориво може да се получи чрез реакцията на Sabatier: $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$, като CO_2 се получава от марсианската атмосфера, а H_2 от електролиза на вода. Очаква се микровълновата плазма да постигне производствени нива на O_2, CO и NOx от 47.0, 76.1 и 1.25 g/h, при съответно енергийна консумация от: 0.021, 0.013 и 0.79 kWh/g съответно; скоростта на производство на O_2 е 30 пъти по-висока от тази на MOXIE, [7].

За космическите оранжерии директното използване на гориво е ограничено, но горивата са критични за: транспорт на модули от Земята до Луната/Марс; повърхностни превозни средства (роувъри) и резервни енергийни системи (горивни клетки).

Водни ресурси на Луната и Марс

Лунен воден лед се намира предимно в постоянно засенчените полярни региони. Концентрациите варират, но са достатъчни за експлоатация. *Марсианските* водни ресурси са от: воден лед в полярни ледени шапки; подповърхностен лед в плитки слоеве на умерени ширини и течна вода под CO_2 ледените шапки на южния полюс, Фиг. 1.

Технологиите за добив на вода са:

А) *Термален добив (thermal mining).* Състои се от: нагряване на съдържащия лед реголит чрез концентрирана слънчева светлина или други източници на топлина; сублимация или изпарение на леда и улавяне на водната пара чрез студени капани (cold traps). Особено подходящ е за повърхностен лед (0.1–0.3 m дълбочина).

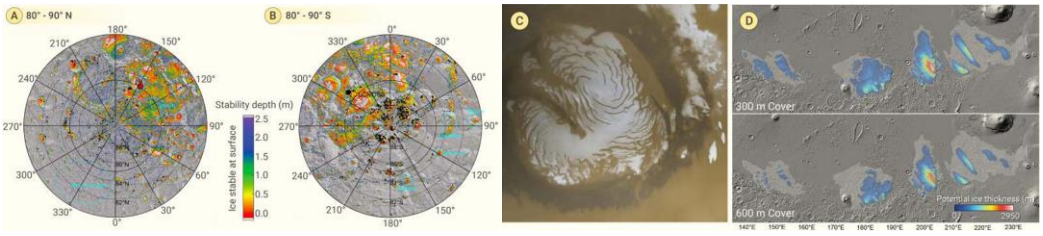
Б) *Механичен добив.* Състои се от изкопаване на съдържащия лед материал и транспорт до енергийно богати зони за екстракция. Има проблеми на използване.

В) *Сондажен добив***:** Използва се за подповърхностен лед на Марс. Прилагат се топли сонди (heat drills) за сублимация.

Да разгледаме системи за рециклиране на вода при затворени цикли в оранжериите. Системата за доставка на хранителни вещества (NDS) е напълно затворена (рециркулационна).

Водата, загубена чрез изпарение и транспирация, се възстановява от кондензатори в системата за управление на атмосферата (AMS). Кондензираната вода се филтрира, стерилизира и се насочва към резервоара с чиста вода. Системата за управление на водата (WMS) осигурява питейна вода за консумация, производство на храна и хигиена, както и среден прием на вода в 1.6–2.8 L/24h на човек. Воднят процесор (WPA) възстановява вода от: кондензат от кабинната влажност (издишана водна пара); произведена вода от реакторите на Sabatier или Bosch и дестилирана урина, хигиенни отпадъци и отпадъци от извънкорабна дейност.

Ефективност на рециклирането: На МКС се постига около 90% възстановяване на водата, а за дългосрочни мисии се изисква над 98% ефективност.



Фиг. 1. Водни ресурси: Северен (А) и южен (В) полюс на Луната, зони с оголен лед (черни точки) и райони, в които ледът е стабилен до определена дълбочина; (С) Северен полярен леден щит на Марс (D) Дебелина на участъци на Марс богати на лед район Medusae Fossae [7].

Системи за поддържане на живота

Оранжериите са интегрирана част от системата за екологичен контрол и поддържане на ECLSS и изпълняват множество функции като: производство на храна (зеленчуци, плодове); генериране на кислород чрез фотосинтеза; намаляване на CO_2 нивата; пречистване на сиви води и психологическа подкрепа за екипажа. Атмосферното управление се състои от*:* поддържане на повишено CO_2 ниво (1000 ppm базова стойност) за оптимален растеж на растенията; мониторинг на O_2 нивата; филтрация на летливи органични съединения (VOC) като етилен и HEPA филтрация за предотвратяване на нежелан микроорганизъм растеж.

Космически програми за оранжерии на МКС и повърхността на Луната

NASA: Листните зелени култури, които бяха успешно валидирани в камерата Veggie на МКС, включват червена маруля „Outredgeous“, горчица Mizuna, листна маруля „Waldmann's Green“, горчица „Wasabi“, пак чой „Extra Dwarf“, къдраво зеле „Red Russian“ и горчица „Amara“. Китайското зеле „Tokyo Bekana“ не се развиваше добре при условията на МКС поради повишено съдържание на CO_2 . Марулята „Драгун“ също се сблъска с трудности, свързани с поливането и съхранението на семената, и ще трябва да бъде тествана отново. Репички „Cherry Belle“, джудже пшеница „Apogee“ и люти чушки Hatch „Española Improved“ бяха успешно отгледани и тествани в Advanced Plant Habitat [4]. Системите за осветление на културите трябва да осигуряват поне 300 μmol m-1 s^{-1}, ако може до 1000 μmol m-1 s^{-1}.

Китай: През 2019 г. Китай прави успешни експерименти за покълване на семена да в лунна почва при подходящи условия на температура и влажност. От април 2026 г. китайски инженери проучват изграждане на оранжерия на лунната повърхност за оцеляване на екипажи през 14-дневната лунна нощ. Заедно с Китай Русия планира да създаде Международна лунна изследователска станция [3]. Предлага се програма китайски лунен дворец (Lunar Palace) [4].

МКС: Културите, тествани на МКС в мисията VEG-03I, показват вариабилност в кълняемостта по растителни семейства над 2,5 години съхранение, като 3 разновидности на кръстоцветните от семейство Brassica („Red Russian“ kale, „Extra Dwarf“ Pak choi и „Wasabi“ sirup) показват отлична кълняемост и растеж, докато два вида маруля от семейство маргаритки („Outredgeous“ и „Dragoon“) показват бавна или никаква кълняемост при същите условия на съхранение. Листна салата с тегло 15 g всеки ден може да осигури 8% от необходимия витамин С и 30% от витамин К, но изисква сценарий на непрекъснато производство без съхранение.

ЕКА: Луната като цел на човешките космически полети ще се изучава чрез програмата „Артемида“ и „Лунното село“ на ЕКА. Целта тези бъдещи мисии е да се остане на лунната повърхност за по дълъг период от време. Вместо презапасяване, както МКС, управлението на ресурсите ще включва рециклиране и използване на местни ресурси. Прилагането на системи за биорегенеративно животоподдържане (BLSS), ще предостави животоподдържащи услуги на екипажа без прекомерна консумация на ресурси [3]. В началото на 21-ви век се правят опити за разширяване на човешките космически мисии на Луната, Марс и астероиди, например с програмата Constellation на НАСА или програмата Aurora на ЕКА [3].

ЕКА предложи отворена архитектура за лунна база, наречена Moon Village, и е един от партньорите в програмата Artemis и предоставя сервизния модул за космическия кораб Orion. Всички останали партньори на МКС, например Канадската космическа агенция (CSA), се завръщат като партньори за Artemis, с изключение на руския Роскосмос.

Култури като къдраво зеле и листа от горчица могат да бъдат добри източници на прясно приготвен витамин С и витамин К, докато култури като грах, боб, елда и дори репички могат да осигурят витамин В1. Например 20 m^2 отглеждани култури при умерена до силна светлина (> 0,25 от слънчева светлина) могат да осигурят целия кислород, необходим за средностатистически член на екипажа [4]. Един от разположените инструменти в Artemis III ще тества растежа на растения и култури на лунната повърхност с видове *Arabidopsis thaliana, Brassica rapa u Wolffia sp*., водно растение.

Япония предлага изследователски център за космическо земеделие и градинарство (Proposed Research Center for Space Agriculture and Horticulture (Chiba University) [4].

Ядрени източници на енергия

При ползване на оксида на плутоний-238 (238Pu), намалението на отделянето на енергия поради ядреното делене е само 0,78% годишно. Източниците на база на 238Pu имат десетки и стотици хиляди пъти по-висока енергиен капацитет спрямо химическите енергийни източници като батерии, горивни клетки и други химични елементи [5].

Най-често използваните изотопи за източници на енергия са 238Pu, кюрий-244 (244Cm) и стронций-90 (90Sr). Верижна реакция от 1 g уран може да произведе до 20 MW енергия, докато методът за генериране от радиоизотопи произвежда само ~ 10 W, но периодът му на полуразпад е 90 години. През 2006 г. сондата New Horizons използва изотопа 238Pu като източник на енергия за оборудването на своя космически кораб. Радиоизотопният генератор съдържа 11 kg високочист 238Pu диоксид и произвежда средно 220 W електрическа енергия по време на цялото пътуване: 240 W първоначално (2006 г.) и 200 W в края на пътуването (2020 г.).

Марсоходът Curiosity е оборудван с източник на енергия 238Pu. Марсоходът използва най-новото поколение радиоизотопен термоелектрически генератор (RTG), наречен многомисионен. Той произвежда 125 W електрическа мощност първоначално и 100 W след 14 години. Система за ядрена спомагателна енергия (SNAP-27 RTG) има в мисията Apollo-14 за захранване на инструментите ALSEP. Генераторът съдържа 3,735 kg диоксид на 238Pu, имал е

топлинна мощност от 1480 W и електрическа мощност от 63 W. Най-често използваният енергиен източник в космическите кораби е 238Pu. Характерно за него е: период на полуразпад от 88 г.; освобождава енергия 5,5 MeV; има специфична мощност от ~ 0,54 W/g, а мощността намалява с ~ 0,78% годишно. Оук Ридж планира да произвежда 300-400 g 238Pu годишно, с последващо увеличение до 1,5 kg. Общите запаси от 238Pu в Съединените щати (според оценки на Министерството на енергетиката на САЩ) са приблизително 35 kg. Това включва остатъците от плутоний, произведен през миналия век на обекта Савана Ривър, както и известен плутоний, закупен от Русия [5]. Марс 2020 Роувър е космическа мисия, която използва плутониеви RTG с мощност около 110 W. При естествения радиоактивен разпад на 238Pu се отделя топлина, която се преобразува в електричество чрез термодвойки. Работната температура на критични компоненти се поддържа от RTG, което е ключово за нощите на Марс.

Предизвикателства и бъдещо развитие

Основни предизвикателства: високи енергийни изисквания за изкуствено осветление; необходимост от почти затворени водни цикли (> 98% ефективност; екстремни температурни условия (особено на Луната); радиационна защита; ниска гравитация и въздействие върху растежа на растенията и ограничена наличност на локални ресурси в началните фази.

Бъдещи направления: развитие на ядрени енергийни системи за непрекъснато захранване; усъвършенстване на ISRU технологиите за производство на вода, кислород и горива; автоматизация и роботизация на селскостопанските процеси; интеграция на водорасли и други микроорганизми в системите за поддържане на живота; мащабиране за постоянни лунни и марсиански селища. Контролирана екологична система за поддръжка на живота (CELSS) от NASA, серията BIOS от Съветския съюз/Русия, Micro-Ecological Life Support System Alternative (MELiSSA) от Европейската космическа агенция (ESA), CELSS Integrated Experimental Platform и Lunar Palace от Китай и затворената екологична експериментална база (CEEF) от Япония.

Заключение

Успешното функциониране на системите за животоподдържане и космическите оранжерии на Луната и Марс изисква интегриран подход към управлението на енергийните, горивните и водните ресурси. Комбинацията от възобновяема слънчева енергия, ядрени системи, усъвършенствани технологии за рециклиране на вода и ISRU за производство на кислород и горива ще бъде критична за устойчивостта на бъдещите извънземни бази и намаляването на зависимостта от доставки от Земята. Технологията за използване на ресурси ISRU извлича и използва ресурси на Луната; воден лед, кислород, Хелий-3 и лунна почва.

Литература:

1. Anderson, M. S., Ewert, M. K., & Keener, J. F. (2018). Life support baseline values and assumptions document (No. NASA/TP-2015-218570/REV1), pp. 1–218. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180001338/downloads/20180001338.pdf
2. Ewert, M. K., Chen, T. T., & Powell, C. D. (2022). Life support baseline values and assumptions document, (NASA/TP-2015–218570/REV2), pp. 1–254. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210024855/downloads/BVAD_2.15.22-final.pdf
3. Maiwald, Volker, et al. "From Antarctic prototype to ground test demonstrator for a lunar greenhouse." Acta Astronautica 212 (2023): 246–260. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.08.012 https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S0094576523004101
4. Fritsche, Ralph, Natasha Haveman, Gioia Massa, Matthew Mickens, Trent Smith, Raymond Wheeler, Bruce Link, and LaShelle Spencer. Space Crop Considerations for Human Exploration. No. NASA/TM-20250001897. National Aeronautics and Space Administration, 2024. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20250001897/downloads/20231215%20Space%20Crops%20HRP%20FINAL%20STRIVES%203.pdf
5. Жизнин, Станислав Захарович, and Владимир Михайлович Тимохов. Радиоизотопные источники энергии. Обеспечение энергетической безопасности, *Энергетическая политика* 1 (2017): pp. 111–122. https://cyberleninka.ru/article/n/radioizotopnye-istochniki-energii-obespechenie-energeticheskoy-bezopasnosti/pdf
6. Hecht, M., Hoffman, J., Rapp, D., McClean, J., SooHoo, J., Schaefer, R., Aboobaker, A., Mellstrom, J., Hartvigsen, J., Meyen, F. and Hinterman, E., 2021. Mars oxygen ISRU experiment (MOXIE). *Space Science Reviews*, *217*(1), p. 9. https://doi.org/10.1007/s11214-020-00782-8 https://openurl.ebsco.com/viewer?sid=ebsco%3Aplink%3Acrawler-gcd&id=ebsco%3Agcd%3A148405750&crl=f&jrnl=00386308&link_origin=scholar.google.com
7. Wu, W., Shen, J., Kong, H., Yang, Y., Ren, E., Liu, Z., Wang, W., Dong, M., Han, L., Yang, C. and Zheng, H., 2024. Energy system and resource utilization in space: A state-of-the-art review. The Innovation Energy, 1(2), p.100029. pp. 1–21. https://doi.org/10.59717/j.xinn-energy.2024.100029 https://pdfs.semanticscholar.org/1122/1604c624c7642a228fc4c98542ce85cb2872.pdf

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

РЕСУРСИ И ЕФЕКТИВНОСТ НА КОСМИЧЕСКИ ОРАНЖЕРИИ НА ПИЛОТИРУЕМИ КОСМИЧЕСКИ КОРАБИ

Павлин Граматиков

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg

Ключови думи: *космически оранжерии, енергийни ресурси, топлинни ресурси, водни ресурси, биорегенеративни системи за животоподдържане*

Резюме: *Изложени са резултати и параметри на космически оранжерии и биорегенеративни системи на САЩ, ЕКА, Китай и Русия. Разгледани са осветителни системи, разход на електроенергия, ефективност, електрически параметри.*

RESOURCES AND EFFICIENCY OF SPACE GREENHOUSES ON MANNED ORBITAL SPACECRAFT

Pavlin Gramatikov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg e-mai

Keywords: *space greenhouses, energy resources, thermal resources, water resources, bioregenerative life-support systems*

Abstract: *The results and parameters of space greenhouses and bioregenerative systems from the USA, ESA, China, and Russia are presented. Lighting systems, power consumption, efficiency, and electrical parameters are examined.*

Въведение

Изхранването на екипаж в космически условия изисква повече от обикновено отглеждане на растения – необходима е и биорегенеративна система за животоподдържане (BLSS) [11]. Тя интегрира енергийната ефективност, топлинния баланс и водната регенерация в затворен цикъл.

В орбита около Земята естественият цикъл светлина-тъмнина е неподходящ за растенията (60 min светлина и 90 min тъмнина), слънчевата светлина е трудно да се улови и предаде ефективно вътре в космическата станцията и се разчита на изкуствено осветление, което е и най-големият консуматор на енергия на космическите оранжерии (КО).

Разход на електроенергия:

Съвременните КО използват LED технологии, които са сравнително енергоемки. Руската оранжерия „Витацикл-Т“ има размери 0,4 m², обем 0,09 m^3 и консумира около 870 W [1].

Прототипът EDEN ISS на Германския аерокосмически център (DLR) консумира приблизително 10 kW електроенергия [5].

Ефективност*:*

При висшите растения преобразуването на енергията на светлината в енергия на хранителните вещества има КПД от порядъка на 0,1% [2].

Спектралното разпределение на енергията и коефициентът на преобразуване на електрическата в светлинна енергия на светлинния източник са важни фактори за оценка на ефективността на осветителната система [3]. Спектралното разпределение на енергията на светлинния източник е важно в два аспекта: фотосинтеза и фотоморфогенеза. Фотосинтезата

се влияе основно от плътността на фотосинтетичния фотонен поток с диапазон 400–700 nm. Фотоморфогенезата и морфологията се влияят от спектъра в диапазона от 300–800 nm. Коефициентите на преобразуване на типичните натриеви и флуоресцентни лампи с високо налягане са съответно около 0,38 и 0,26. Коефициентът на преобразуване на съвременните LED лампи е около 0,40, който ще бъде подобрен през следващите години [3].

Алтернативни концепции:

Съществува идея за „слънчеви биопанели“, при които едноклетъчните водорасли (хлорела) [9] абсорбират слънчевата светлина директно извън космическия кораб. Този метод драстично повишава ефективността до 10% (сравнимо със слънчевите панели) и значително намалява нуждата от скъпоструваща вътре енергия.

Електрически и ресурсни параметри на космически оранжерии

КО изискват значителни електрически ресурси при поддържането на напълно контролирана среда – осветление, климатизация, циркулация на вода и хранителни разтвори, мониторинг и автоматизация.

EDEN ISS – земен изпитателен стенд за КО

Данните от реални мисии като EDEN ISS дават конкретна представа за електрическите параметри и ресурсни нужди на КО. Осветлението (LED системи) е най-големият консуматор на енергия. В EDEN ISS е измерена консумация на отделни LED модули при различни нива на осветеност, което позволява изчисляване на общата мощност за фотосинтетично активна радиация (ФАР). Атмосферното управление (AMS) служи за регулиране на CO_2, кислород, температура и влажност. Термалният контрол (TCS) служи за отопление, охлаждане и отвеждане на топлина от осветителни и електронни системи. Системата за хранителни разтвори (NDS), отговаря за помпи, циркулация на вода, поддържане на pH и електропроводимост. Системата за мониторинг и управление (CDHS) се състои от сензори, камери, телеметрия, дистанционно управление. EDEN ISS използва телеметрична система с контролен център. Разпределението на енергията (PDS) включва стабилизатори, преобразуватели, резервирани линии за критични системи [5, 6]. Потреблението на електроенергия е 6600–7800 KWh на месец. Общата мощност от февруари до ноември 2018 г. е около 68 516 KWh, което съответства на 5481 KWh/m^2 от обработваемата площ. По време на фотопериода LED са включени, освен тъмния период от 7 часа. Средната консумация през фотопериода е 11,23 KWh, а през тъмния период е 8,21 KWh. В 00:00 часа LED се включват с понижена интензивност. За един час LED напълно се включват в периода на който е запланиран обичайния нощен ритъм на работа на космонавтите. В 08:00 часа LED се включват на „разсвет“ с намалена интензивност. В 09:00 часа LED се превключват на нормално ниво на интензивност до 23:59. Част от електрическата енергия, използвана от LED, се преобразува в топлина, която нагрява въздуха вътре във FEG (Future Exploration Greenhouse), а FEG отдава топлина в околната среда. AMS е оборудван с нагреватели за подгряване на атмосферата на FEG. Освен подсистемите за управление на атмосферата и подсистемите за терморегулация, подсистемата за осветление също има висока потребност от електроенергия – 28% от общата енергия MKS EDEN. Младите растения обикновено получават по-малко светлина в сравнение с напълно зрелите растения. При сравняване SPFGC (South Pole Food Growth Chamber, оранжерия на американската станция на Южния полюс) има 9,5 KWh/m^2 за 24 h, а EDEN ISS – 5,7 KWh/m^2 за 24 h енергия за осветителни тела или 60 %. За сезон 2018 година EDEN ISS произвежда 517 kg биомаса от 55 055 KWh, от които 268 kg са хранителни, или ~ 205 kWh електроенергия на килограм произведени продукти. Производителността на EDEN ISS за 2018 г. е 0,08 kg/m^2 за 24 h при засадени салатни и зеленчукови култури, а не бобови и зърнови.

Хидропоника и среда за отглеждане

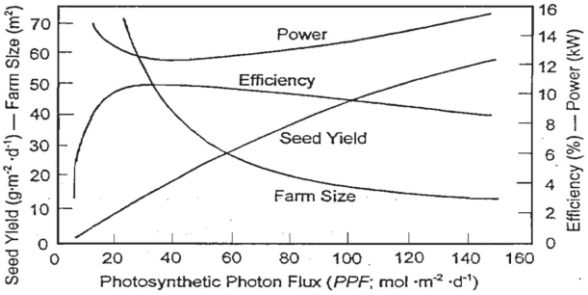
Без почва КО разчитат на хидропонни или аеропонни системи, за доставяне на вода и хранителни вещества директно до корените на растенията. Хранителните системи циркулират вода, обогатена с макро- и микроелементи, контролирана за поддържане на желано pH и електрическа проводимост. Пулверизатори разпръскват фини капчици, като подобряват газообмена и намаляват потреблението на вода до 90%, в сравнение с наземното земеделие. Интегрирани сензори измерват съдържанието на влага, концентрациите на хранителни вещества и кислород на кореновата зона в реално време за да предотвратят липси и да осигурят автоматични корекции [3]. Изискванията на околната среда на растенията се различават в сравнение с изискванията на екипажа. Например, оптималното парциално налягане на CO_2 за растеж на растенията е приблизително 0.10 до 0.20 kPa (Wheeler, et al., 1993); под това продуктивността намалява. Чувствителността към CO_2 може да варира при различните видове, но растенията имат намалена продуктивност при много високо парциално налягане на CO_2, което

се счита за нормално за екипажа (около 1.0 kPa). Растенията се нуждаят от по-висока относителна влажност (75%) за да избегнат воден стрес и да минимизират използването на хранителни вещества, но тя е най-високо ниво за комфорт на екипажа [12].

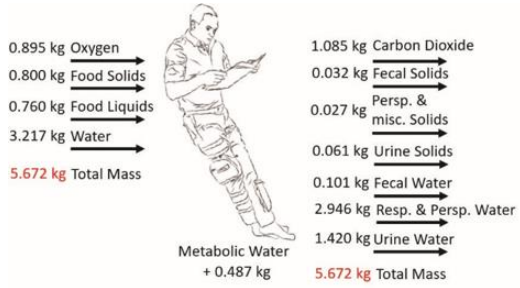
Оптимизиране на осветлението и фотосинтезата

Изкуственото осветление допълва или замества естествената слънчева светлина, когато пряката слънчева светлина не е налична. Високоефективните LED панели осигуряват фиксирани дължини на вълните – синя светлина за разширяване на листата и червена светлина за цъфтеж – за оптимизиране на скоростта на фотосинтеза. Контролира се интензитета на LED с цел намаляване на консумацията на енергия [4]. Светлоотразителите осигуряват равномерно разпределение на осветеността и минимизират зоните на сенките.

На фиг. 1 са дадени зависимости на четири показатели: „Ефективност“, означена с E (%); „Добив на семена“ е среден добив на семена на m² на ден [g.m^{-2} d^{-1}]; „Мощност“ е мощността за осветление [kW] и „Размер на фермата“ [m^2] е площта на посевите, нужни за осигуряване на количеството зърно за дневната хранителна дажба на един член от екипажа. Дневният интегриран поток на фотони е обозначен като PPF (photosynthetic photon flux, [mol m^{-2} d^{-1}]) [4].



Фиг. 1. Зависимости на фотосинтетичната продуктивност на пшеницата от дневния PPF [4]



Фиг. 2. Дневен масов баланс на астронавт с тегло 82 kg [11]

Съвременните космически фотоволтаици преобразуват по-широк спектър от слънчева светлина в електричество и имат ефективност на преобразуване над 30%, повече от типичните земни фотоволтаици. За да поддържат оптимални ъгли на падане, космическите фотоволтаици може да използват едноосни или двуосни тракери. Непрекъснато захранване е нужно за КО, дори по време на затъмнения или планетарни нощи. Системите за съхранение на енергия комбинират акумулаторни батерии с висока енергийна плътност и суперкондензатори за бързо разреждане по време на пикови натоварвания. На борда регулатори на напрежението и устройства за управление на захранването разпределят електрическата енергия към системите за животоподдържане, осветление, термичен контрол и циркулация на водата.

Биорегенеративни животоподдържащи системи

Биорегенеративната животоподдържаща система използва живи организми, за да преобразува отпадъците в използваеми ресурси. Растенията играят централна роля в тази затворена екосистема, превръщат въглеродния диоксид в кислород чрез фотосинтеза, произвеждат ядлива биомаса и пречистват водата. Тези системи целят да създадат затворена среда, където входящите и изходящите ресурси остават балансирани по време на дълги мисии.

В космическата кабина под налягане екипажът постоянно издишва въглероден диоксид (CO_2) и отделя влага, а без регенерация, нивата на CO_2 бързо стават токсични, виж на фиг. 2 дневния масов баланс на астронавт с тегло 82 kg, който се използва при разчет на BLSS [11]. Растенията решават тези проблеми чрез: абсорбиране на CO_2 и отделяне на O_2 под въздействието на светлина; емитиране на водна пара (която може да се събира и кондензира); абсорбиране на летливи органични съединения през устицата на листата и създаване на ядлива биомаса. Използването на водораслите във фотобиореактори подобрява газообмена в космическата кабина. Микроводорасли като хлорела могат бързо да поглъщат CO_2 при оптимални условия на светлина и хранителни вещества [9]. Хлорелата е инструмент за поддържане на атмосферния баланс.

Осветителни системи и спектрална оптимизация

Ключов параметър за растежа на растенията е осветлението, а ефективността на електрическото осветление зависи от ефективността на преобразуването на електричеството в радиационна енергия и посоката на тази енергия към растението [10]. Ефективността на преобразуване зависи от типа на осветителното тяло. Много фактори влияят върху фотосинтетичното активно излъчване (PAR). Фотосинтетичният фотонни поток (PPF) е друг начин за изразяване на PAR, но чрез квантови единици, като [μmol/(m²·s)], вместо [W/m²] [11]. Камерата за производство на биомаса (BPC) в Космическия център Кенеди използва

нестандартни рефлектори и постига рейтинг около 10–15% (Wheeler, 2017). Фотосинтезата и растежът на растенията се определят от молове фотони. Затова е важно да се сравнява ефективността на светлината въз основа на ефективността на фотоните с единици микромоли фотосинтетични фотони на джаул входна енергия. Това е особено важно при LED диодите, където най-ефективните диапазони са в дълбоките червени и сини дължини на вълната [11].

За системата за растеж на зеленчукови растения на МКС, общата ефективност на светлинните източници е около 40% при максимална светлина (Bourget, M, 2014). Индивидуалната ефективност на LED е различна за съответните цветове: за червен 34,5%; за син 69% и за зелен 24,5% [11]. Осветителните LED панели са адаптирани за растежа на растенията и излъчват ленти, насочени към пиковете на абсорбция на хлорофил. Чрез регулиране на съотношението на синя и червена светлина се контролират морфологията, времето на цъфтеж и добива на култури. Графиците за затъмняване и осветяване имитират циклите ден-нощ за да поддържат циркадните ритми и да подобрят стреса на растенията.

Космически оранжерии на САЩ

NASA и университети на САЩ активно разработват затворени системи за дълбокия космос. Системата URRM (Utah Reusable Root Module) е модул с автоматизирана система за фертигация (напояване и торене), която поддържа повторната употреба на заместител на почвата. По време на наземни тестове системата е произвела над 1 kg прясна биомаса (Mizuna) за 17 дни, демонстрирайки висока ефективност на използване на водата – над 2 g биомаса на литър [7, 8]. На борда на Международната космическа станция (МКС) е успешно проведено отглеждане на растения при експерименти на NASA (това са КО Veggie и Advanced Plant Habitat, в които са засадени маруля, цинии и други култури). След редица експерименти са уточнени перспективните растения за КО, виж Таблица 1 [11].

Китайска космически оранжерии и биорегенеративни системи

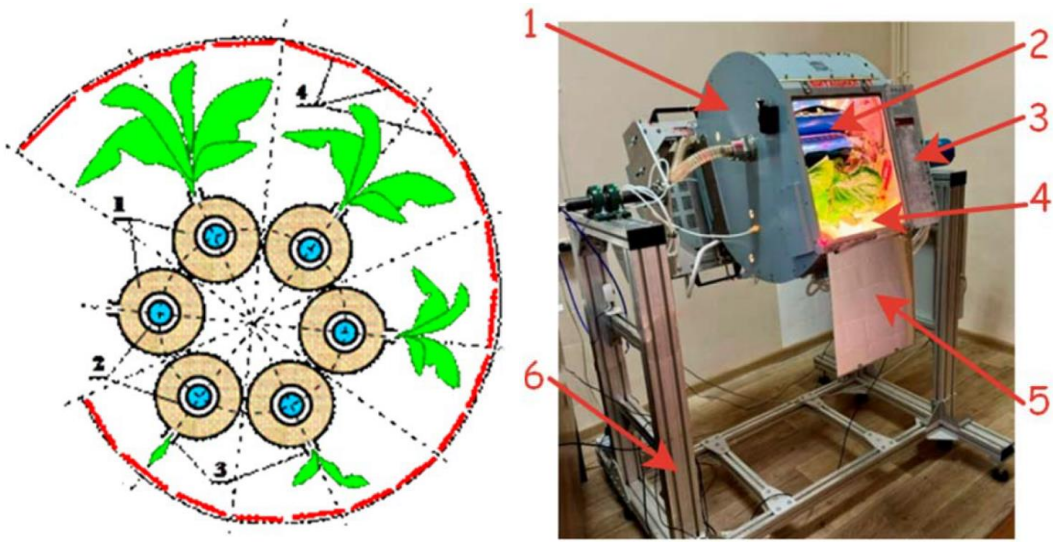
Китай постига значителен напредък в развитието на КО при експерименти в своята орбитална станция. В китайската орбитална космическа станция „Тянгун“ (Небесен дворец) редовно се отглеждат растения с два типа установки – едната използва субстрат, а другата аеропоника. От 2016 г. китайските астронавти отглеждат маруля, ориз, домати, жито, лук, сладки картофи, салати, домати джудже, зелен лук, листна култура Gynura bicolor и други. През 2022 г. за първи път в света е завършен пълен жизнен цикъл на ориз в космоса, от семе до семе. През 2025–2026 г. са въведени хидропонни и аеропонни системи, които пръскат вода под формата на мъгла, за да я пестят ефективно. През 2026 г. започва експеримент за проследяване на наследствеността на ориза в две поредни поколения в орбита. В пустинята Бадайн Джаран (близо до центъра за изстрелване на сателити Дзиуцюен) има високотехнологична вертикална оранжерия, където се използва хидропоника, LED осветление и интелигентни системи за контрол на климата и се симулират условия, близки до тези в космоса. Към септември 2026 г. Китай съобщава, че е отгледал в космоса над 20 разновидности от 14 растителни вида, сред които маруля, морков, слънчоглед, картоф и пшеница. Важна предистория е китайският експеримент Lunar Palace 1 в Пекин. В затворен комплекс с обем около 500 m^3 трима участници живеят 105 дни и отглеждат царевица, фъстъци, леща и краставици. Част от биологичните отпадъци се преработват за повторно използване при отглеждането на растения.

Руска космическа оранжерия

Руските изследвания са фокусирани върху разработване и тестване на конвейерна автоматизираната оранжерия Vitacycle-T за руския сегмент на МКС, фиг. 3. В схемата от фиг. 3 обозначенията са: 1 – цилиндри на модулите за корените; 2 – пористи тръби (тензиометри); 3 – отверстия за посаждане и 4 – панели на LED. На външния вид от Фиг. 3 обозначенията са: 1 – външен корпус вегетационния модул; 2 – модул за корените; 3 – блок управление и регистрация; 4 – панели на LED; 5 – люк за достъп и 6 – наземен изпитателен стенд. Тази КО е проектирана за конвейерно отглеждане на листни зеленчуци (като китайско зеле) за допълване на диетата на космонавтите с витамини. Капацитетът на руската КО се оценява на 84 g зелена маса на ден, което е достатъчно, за да осигури на един член от екипажа витамини А и С.

Таблица 1. Растения за поддържане на живота, предназначение и условия за растеж [11]

Реколта	ELS Транспорт Crop	ELS Повърхност Crop	Фотосинтеза Поток от фотони [mol/(m²•d)]	Дневен режим ФотоПериод [h/d]	Растеж Точка [dAP]	Температури [C]		
						Въздух по време на ден	Въздух по време на нощ	Хранителен разтвор
Зеле	u	u	28 (2)		85 (4)	>25		
Морков	u	u	28 (2)		75 (4)	16-18		
Chard	u	u	17 (2)	16	45 (3)	23	23	23
Целина			17 (2)		75 (4)			
Сух боб		u	24 (3)	18	85 (5)	28	24	26
Зелен лук			26 (6)		50 (5)	25	25	25
Маруля	u	u	17 (3)	16	28 (3)	23	23	23
Гъби			0	0				
Лук	u	u	17		50			
Грах			24 (2)		75 (4)			
Фъстъци		u	27 (3)	12	104 (3)	26	22	24
Pepper			27 (2)		85 (5)			
Репичка	u	u	26 (6)	16	25 (4)	23	23	23
Червено цвекло			17 (3)	16	40 (3, 7)	23	23	23
Ориз		u	33 (3)	12	85 (3)	28	24	24
Snap Bean			24 (2)	18	85 (5)	28	24	26
Соя		u	28 (3)	12	97 (3)	26	22	24
Спанак	u	u	17 (3)	16	30 (4)	23	23	23
Ягода			22 (3)	12	100 (4)	20	16	18
Сладък картоф		u	28 (3)	12	85 (5)	26	22	24
Домат	u	u	27 (3)	12	85 (3)	24	24	24
Пшеница		u	115 (4)	20-24	75-90 (3)	20	20	18
Бял картоф		u	28 (3)	12	132 (8)	20	16	18



Фиг. 3. Схема и външен вид на конвейерна космическа оранжерия Vitacycle-T [1]

Бъдещи проекти

Текущ проект на ESA Space Solutions е TRANSFORM. Той обединява автоматизирана, модулна оранжерия с фотобиореактор с микроводорасли за пречистване на отпадъчна вода и възстановяване на хранителни вещества. TRANSFORM се води като feasibility study–ESA описва проекта като концептуална и доказваща осъществимост, а не като готова космическа оранжерия, предназначена за изстрелване [12].

Заключение

Системата за контрол на околната среда и поддръжка на живота (ECLSS), осигурява кислород, вода, храна и други незаменими ресурси на екипажа в космически условия. Възстановяването на кислород и вода от ECLSS в МКС достига съответно 47% и 93%, докато тези на Земята могат да бъдат по-високи, отчасти благодарение на въвеждането на растения. Бъдещите космически станции планират да разширят оранжерийните модули и да подобрят биорегенеративните системи за животоподдържане за да се намали зависимостта от снабдяване и да се подобри безопасността и гъвкавостта на мисиите.

Литература:

1. Беркович, Ю. А., Беляк, А. М., Буряк, А. А., Смирнов, Ю. И., & Иванова, А. А. (2025). Витаминная космическая оранжерея как элемент перспективной биолого-технической системы жизнеобеспечения космических экипажей. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, *24*(2), pp. 7–18. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-7-18 https://journals.ssau.ru/vestnik/article/viewFile/28690/11321
2. Ребеко, А. Г. (2016). Солнечные биопанели как основа системы жизнеобеспечения космических аппаратов. Идеи КЭ Циолковского в инновациях науки и техники, pp. 183–184. https://readings.gmik.ru/lecture/2016-SOLNECHNIE-BIOPANELI-KAK-OSNOVA-SISTEMI-ZHIZNEOBESPECHENIYA-KOSMICHESKIH-APPARATOV
3. Kozai, Toyoki. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy, Series B* 89.10 (2013), pp. 447–461. https://doi.org/10.2183/pjab.89.447 https://www.jstage.jst.go.jp/article/pjab/89/10/89_PJA8910B-01/_pdf
4. Berkovich, Y.A., Buryak, A.A., Ochkov, O.A., Smolyanina, S.O. and Lapach, S.N., 2022. Minimization of the equivalent system mass of a vitamin greenhouse with LED lighting for various scenarios of space missions. *Acta Astronautica*, *198*, pp. 403–409. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.05.003 https://pdf.sciencedirectassets.com/271447/1-s2.0-S0094576522X00076/1-s2.0-S0094576522001990/main.pdf
5. Zabel, P., Vrakking, V., Zeidler, C., & Schubert, D. (2022, July). Energy and power demand of food production in space based on results of the EDEN ISS Antarctic greenhouse. 51st International Conference on Environmental Systems, pp. 1–11. https://ttu-ir.tdl.org/server/api/core/bitstreams/24ba23b0-baa5-4792-82e1-2b6a2c7b5f3c/content
6. Zeidler, C., Vrakking, V., Bamsey, M., Poulet, L., Zabel, P., Schubert, D., ... & Domurath, N. (2017). Greenhouse module for space system: a lunar greenhouse design. Open Agriculture, 2(1), pp. 116–132. DOI: 10.1515/opag-2017-0011 https://hal.science/hal-03916760v1/file/%5B2017%5D%20Zeidler%20Greenhouse%20Module%20for%20Space%20System%20A%20Lunar%20Greenhouse%20Design.pdf
7. Gioia Massa, Trent Smith, 2nd International Workshop on Space Agriculture and Horticulture, Chiba,16–18 March 2026, https://ntrs.nasa.gov/citations/20260002161 https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20260002161/downloads/GMASSA%20TSMITH%20Chiba%202026.pptx
8. Gioia Massa, Raymond Wheeler, Matthew Mickens, Trent Smith, Meeting: 2nd GNU Space Bio International Symposium, Gyeongsang National University, January 12, 2026, NASA Technical Management https://ntrs.nasa.gov/citations/20260000312 https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20260000312/downloads/GMassa%202nd%20GNU%20symposium.pptx
9. Gramatikov, P., Totorov, R., Hotinov, B., Karadjov, J. Biotechnology module for space biological life support systems. Association Scientific and Applied Research, Konstantin Preslavsky University Press, 15, JOURNAL SCIENTIFIC AND APPLIED RESEARCH, 2019, ISSN:1314-6289, pp. 22–30. DOI: 10.46687/jsar.v15i1.251 https://rst-tto.com/rsttakt/images/vol_15.pdf#page=23
10. Gramaticov, Pavlin; Ivanova, Tania, SVET-2 Space Greenhouse Light Unit, Aerospace Research in Bulgaria (ISSN 0861-1432), No. 16, (2001), pp. 24–34. http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ARBl...16...24G
11. Ewert, Michael K., Thomas T. Chen, and Camilah D. Powell. "Life support baseline values and assumptions document." (2022), pp. 1–200. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210024855/downloads/BVAD_2.15.22-final.pdf
12. https://business.esa.int/projects/transform

ОСНОВНИ МОМЕНТИ ОТ ГЕОПОЛИТИЧЕСКОТО ПРОТИВОПОСТАВЯНЕ В КОСМОСА МЕЖДУ ИЗТОКА И ЗАПАДА И ВЛИЯНИЕТО МУ ВЪРХУ РАЗВИТИЕТО НА КОСМИЧЕСКАТА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Павел Пенев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ppenev@space.bas.bg

Ключови думи: *Съперничество в Космоса, световни космически събития, бордни компютри, Български суперкомпютър, малки спътници, разузнавателни спътници, приложения на нискоорбитални многоспътникови конфигурации „Starlink“ и „Рассвет“*

Резюме: *Анализирани са световни космически постижения, определящи различните периоди на космическото противопоставяне между Изтока и Запада през XX и XXI век, включително във войната в Украйна (2022–2026 г.). Показано е мястото на България в геополитическото съперничество в Космоса между Изтока и Запада през Студената война. Формулирани са последствията от научно-техническия прогрес и създадените върхови технологии върху развитието на космонавтиката през последните десетилетия.*

KEY ASPECTS OF THE GEOPOLITICAL SPACE RIVALRY BETWEEN EAST AND WEST AND ITS IMPACT ON THE DEVELOPMENT OF SPACE HARDWARE AND TECHNOLOGIES

Pavel Penev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ppenev@space.bas.bg

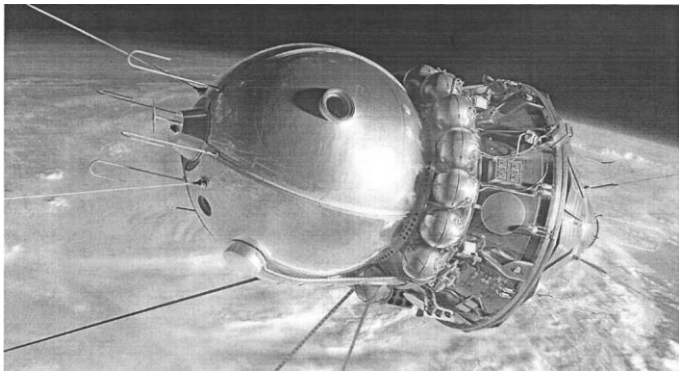
Keywords: *Space rivalry, global space events, onboard computers, Bulgarian supercomputer, small satellites, reconnaissance satellites, applications of low-Earth orbit multi-satellite constellations such as Starlink and Rassvet*

Abstract: *The study analyzes global space achievements that defined the various periods of space-related confrontation between East and West during the 20th and 21st centuries, including the war in Ukraine (2022–2026). It highlights Bulgaria's role in the geopolitical rivalry in space between East and West during the Cold War. Furthermore, it outlines the impact of scientific and technological progress and the development of cutting-edge technologies on the evolution of astronautics in recent decades.*

Съперничеството в Космоса има за човечеството както позитивни, така и негативни последствия. От една страна, то обединява усилията на редица държави за ускоряване на научно-техническия прогрес, включително на технологиите и подобряване на живота на хората [1]. От друга страна, то е неразривно свързано с противоборството на определени участници в космическата надпревара, със създаването и използването на военнокосмически системи (ВКС), включващи космически летателни апарати (КЛА) с различно целево предназначение и съответни наземни сегменти. По такъв начин проникването в Космоса е и част от геополитическото съперничество между Изтока и Запада главно чрез военна сила и внедряването на нови технологии.

Първото остро геополитическо противопоставяне в Космоса между СССР и САЩ възниква през средата на XX век. Поредната научно-техническа революция стремително навлиза във военното дело първоначално в САЩ и СССР чрез внедряване на постиженията на кибернетиката, ракетната техника, електрониката, и изчислителната техника. Създадени са

ракети-носители (РН) на балистически ракети (БР). На тази основа по-късно се извеждат в орбита изкуствени спътници на Земята (ИСЗ), известни и като „сателити“, както и космически кораби (КК). Кулминация на геополитическото противопоставяне в Космоса във втората половина на 50-те години на XX век е изстрелването на 04.10.1957 г. от СССР с РН „Р-7“ на първия ИСЗ – „Спутник-1“. Няколко години по-късно е създаден първият пилотиран КК „Восток-1“ (фиг. 1), изведен на 12.04.1961 г. в околоземна орбита с РН „Р-7“, с който за пръв път в света летецът-космонавт Юрий Гагарин извършва космически орбитален полет.

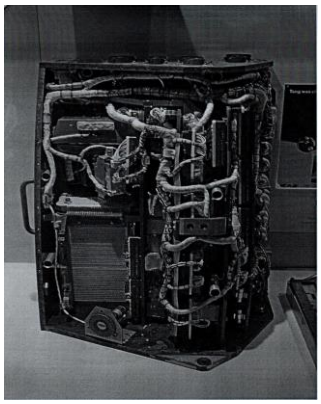


Фиг. 1. Общ вид на космическия кораб „Восток-1” с летец-космонавт Юрий Гагарин

Аналогичен подход в геополитическото противопоставяне в Космоса между Изтока и Запада се прилага и от САЩ. Своят първи сателит „Explorer-1“ САЩ извеждат в Космоса на 01.02.1958 г. с помощта на четиристепенна РН „Jupiter-C“ (форсирана версия на БР „Redstone“). По-късно, на 20.02.1962 г. американският астронавт Джон Глен с КК „Mercuri-5“, използващ РН „Atlas-6“ (също на основата на БР), извършва три обиколки на Земята.

Пилотируемите едноместни КК в средата на 60-те години на XX век постепенно се заменят с многоместни КК. Поставя се следващата цел – излизане на човек в откритият Космос, която се постига в хода на орбиталния полет с КК „Восход-2“ с екипаж от двама космонавти. Първият човек, излязъл в открития Космос на 18.03.1965 г. с продължителност 12 мин. и 9 сек., е съветският космонавт Алексей Леонов. **По такъв начин до средата на 60-те години на XX век в геополитическото противопоставяне в Космоса, включително по отношение на пилотируемите космически полети, водеща страна е СССР.**

През 60-те години на XX век в състава на оборудването на многоместните КК на САЩ и СССР навлизат първите бордови цифрови електронно изчислителни машини (БЦЕИМ), наричани още бордови компютри, осигуряващи решаване на задачите на навигацията, управлението и контрола на полетите. Първият бордови компютър лети в Космоса през 1965 г. на борда на американския многоместен КК от серията „Gemini“ (фиг. 2).

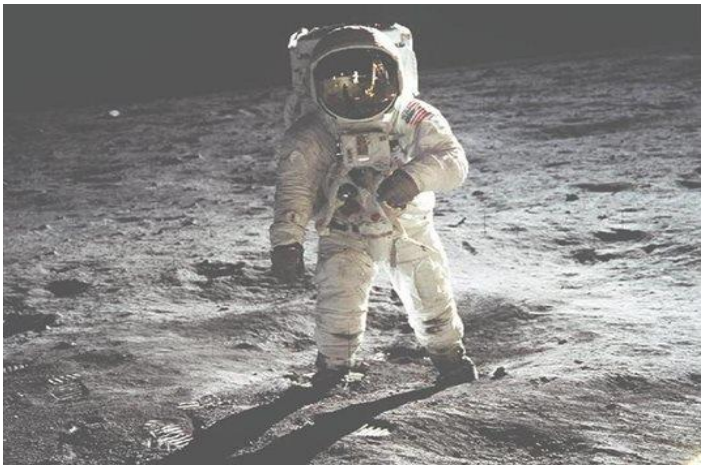


Фиг. 2. Външен вид на бордовия навигационен компютър на космическия кораб „Gemini“

Оборудването на космическите кораби с бордови навигационни компютри прави възможно маневрирането и скачването им в Космоса с други КЛА, като на 16.08.1966 г. се осъществява за пръв път ръчно скачване на КК „Gemini-8“ с ракетата „Agena-D“. Съветските космически кораби от серията „Союз” в края на 60-те години на XX век започват да решават практически задачите на маневрирането и скачването в Космоса на основата на БЦЕИМ.

Геополитическото противопоставяне между Изтока и Запада се задълбочава през 60-те години на XX век с развитието на ВКС, създаването на тежки и свръхтежки РН от

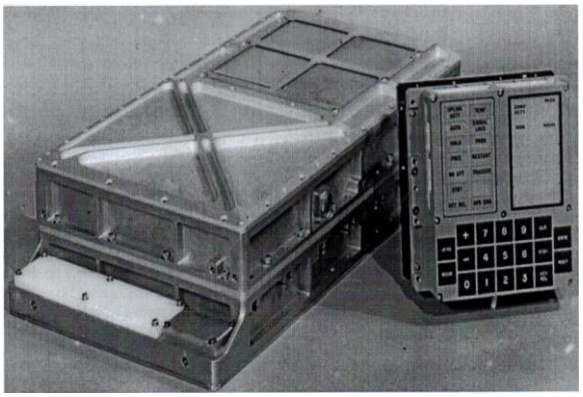
САЩ и СССР и въвеждането на изчислителната техника в космонавтиката, включително на съвременни бордови компютри. Големите технологични постижения и натрупаният космически опит от САЩ са основни предпоставки за голямата кулминация в края на 60-те години на XX век – изпълнение на **програмата „Apollo“ за кацане на човек на Луната** (фиг. 3).



Фиг. 3. Астронавтът Едуин Олдрин на Луната

За пръв път в историята на човечеството на 21.07.1969 г. Нийл Армстронг стъпва на лунната повърхност, последван от Едуин Олдрин, На стъклото на скафандъра на последния (фиг. 3) се вижда отражението на Армстронг и на лунния модул.

За реализиране на кацането на Луната командният и лунният модул на американския КК „Apollo“ са включвали на борда си по един управляващ компютър „AGC“ (Apollo Guidance Computer – управляващ компютър на Apollo), разработен през 1966 г. (фиг. 4).



Фиг. 4. Бордният управляващ компютър AGC на космическия кораб „Apollo“ (от ляво) и интерфейсът за управлението му от астронавтите (в дясно)

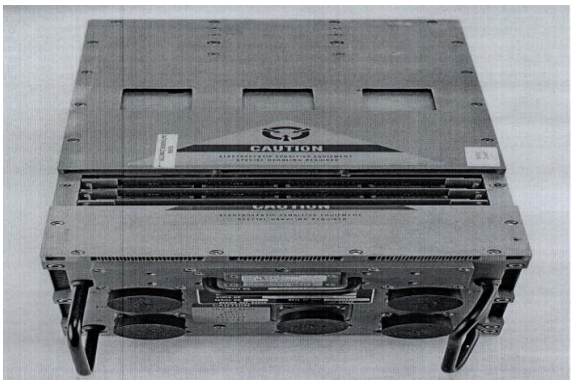
В конструкцията му за пръв път в историята на космонавтиката са използвани микросхеми, а бързодействието му е 40 000 операции в секунда (рекордно постижение за онова време). При това бордовият управляващ компютър „AGC“ на командния модул е бил основно изчислително средство на системата за навигация и управление на КК „Apollo“, а бордовият управляващ компютър „AGC“ на лунния модул „Орел“ е функционирал със собствена система за управление, навигация и контрол. Последният се е използвал за най-отговорната част от полета – кацането на астронавти на повърхността на Луната. По такъв начин, **лунната надпревара на САЩ със СССР в края на 60-те години на XX век е спечелена убедително от САЩ.**

Поредната кулминация на геополитическото съперничество в Космоса между Изтока и Запада през 70-те години на XX век е свързана с по-нататъшното развитие на ВКС и **създаването от СССР и САЩ на пилотируеми орбитални станции (ОС) около Земята.** В периода 1971–1983 г. от страна на СССР в Космоса летят общо седем ОС от серията „Салют“. като се натрупва значителен практически опит в използването им. При това станциите „Салют-2“, „Салют-3“ и „Салют-5“ са официалните (явните) названия на военните ОС „Алмаз“. На борда им космонавтите извършват космическо наблюдение и разузнаване, включително електронно. Ключова цел на ОС „Алмаз” е получаването на детайлни изображения на

стратегически земни и морски обекти, във видимата част на спектъра с пространствена разделителна способност до 0,35 m, която е постигната. В резултат на дейността на екипажите на военните орбитални станции „Алмаз“ се установява, че визуалните и оптическите наблюдения от Космоса се характеризират със **свойството „свръхвидимост“** [5], свеждащо се до възможността за различаване на малки обекти, които с отчитане на разсейването на атмосферата не трябва да бъдат видими. Така например, докато морското дъно от борда на кораб е видимо на дълбочина до 70 m, на космически изображения то е видимо на дълбочина до 200 m. Това позволява да се контролират от Космоса наличието и преместването на различни ресурси в световните океани.

Определени усилия в областта на ОС полагат и САЩ. През 1973–1974 г. в околоземна орбита са извършени три смени на екипажите на пилотируемата ОС „Skylab“, а през следващите години същата лети в безпилотен режим. **През разглеждания период, по отношение на пилотируемите орбитални станции, в геополитическото съперничество в Космоса СССР е водещ, по-активен и резултатен спрямо САЩ.** Същевременно се натрупва ценен опит от двете космически суперсили в създаването по-късно на Международната космическа станция (МКС).

Следваща кулминация на геополитическото съперничество в Космоса между Изтока и Запада в началото на 80-те години на XX век е стартирането от САЩ на програмата „Space Shuttle“**.** Както е известно, **на 12.04.1982 г. се извършва първият пилотируем орбитален полет на въздушнокосмическия кораб (ВКК) за многократно използване „Columbia“,** а последният (135-ят) – на 08.07.2011 г. Успехът на програмата „Space Shuttle“ до голяма степен се определя от сложната, съвременна и ефективна електроника на совалката, използвана за управление на системите ѝ, както и от мощния бордови изчислителен комплекс, включващ пет бордови компютъра на корпорация IBM – космическа версия AP-101, (фиг. 5).



Фиг. 5. Основният бордови компютър IBM AP-101 на въздушнокосмическия кораб за многократно използване “Space Shuttle”

От тези компютри на борда на совалката един от тях е отговарял за управлението на полета, а вторият – за осигуряване на жизнедейността на екипажа, за навигацията и обработката на данни. Паралелно с тези два компютъра са функционирали други два компютъра AP-101, изцяло дублиращи функциите на първата двойка в случай на отказ. Петият компютър е бил резервен и е действал независимо.

Военната програма на ВКК за многократно използване “Space Shuttle” е елемент на геополитическото противопоставяне между САЩ и СССР. Тази програма включва извеждане на ниски околоземни орбити (НОО) на военни (включително разузнавателни) сателити; на елементи на космически ударни системи; обслужване на КЛА в орбита (ремонт, дозареждане); доставяне обратно на Земята на различни космически обекти; прехващане на чуждестранни КЛА, включително „пленяването им” в Космоса и доставяне на Земята.

България през 80-те години на XX век има своето място в геополитическото противопоставяне в Космоса, поради постиженията си в изчислителната техника. През 1986 г. у нас е произведен суперкомпютър [2] с централна изчислителна машина ИЗОТ 1014 и десет матрични процесора ЕС 2706 с производителност 120 милиона операции в секунда (фиг. 6). Матричните процесори ЕС 2706 по своята същност са паралелни изчислителни машини, реализиращи цифрова обработка на големи масиви от данни.

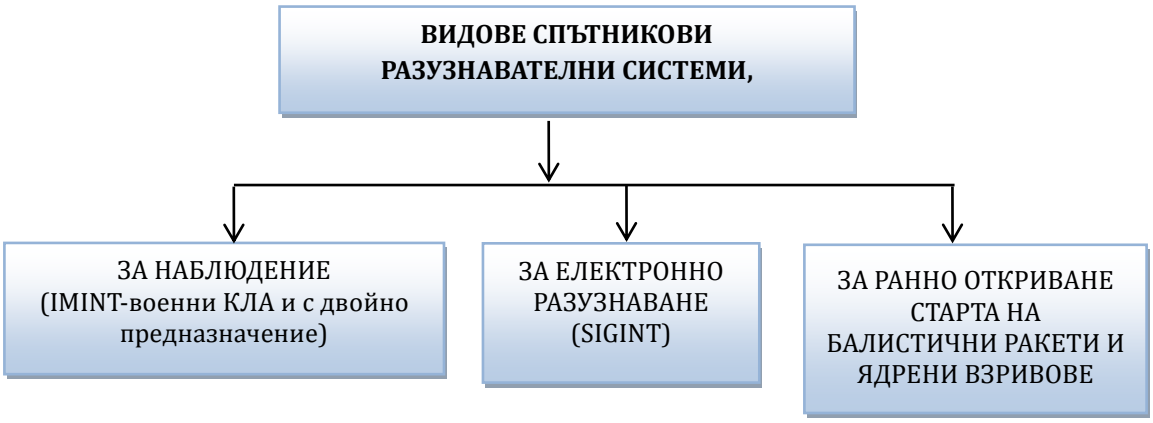


Фиг. 6. Българският суперкомпютър с централна машина ИЗОТ 1014

ЕС 2706 ,азполагат с управляваща памет и осигуряват на потребителите създаването на специфични обработващи функции, при което се постига висока производителност на суперкомпютъра. Създаденият български суперкомпютър в два екземпляра, в условия на секретност, е включен в конфигурацията на Центъра за управление на полетите на съветския ВКК за многократно използване „Буран“ с основна задача – динамична корекция на траекторията за автоматичното му кацане на летището в Байконур. На двата суперкомпютъра терминалите за достъп до тях са българските персонални компютри „Правец-16“ и „Правец-8“. В резултат, при завръщането си от Космоса на 15.11.1988 г., в условия на страничен вятър, орбиталният самолет (ракетоплан) „Буран“ успешно извършва първото в света автоматично кацане на летището в Байконур.

Близо 24 години по-късно, при други променени геополитически условия на 22.04.2010 г. в САЩ също така се извършва автоматично кацане на ВКК за многократно използване „X-37B“ OTV от Космоса на пистата на авиобаза „Ванденберг“ в Калифорния. Създаването на **безпилотната минисовалка „X-37B“ OTV е значимо аерокосмическо постижение и е начало на поредната кулминация на геополитическото противопоставяне в Космоса между Изтока и Запада през XXI век.** Същата функционира на височини 200–750 km в Космоса, като е способна бързо да променя параметрите на орбитата си и да маневрира. Това й позволява изпълнение на широк спектър от функции и задачи, включително разузнавателни; инспекции и прехвати на КЛА; контрол на космическата обстановка; извеждане в открития Космос на малки КЛА (МКЛА); провеждане на научни експерименти; тестване на перспективни технологии, а според някои специалисти може да се използва и като космическо оръжие. За периода 2010 г. – 2026 г. орбиталния самолет за многократно използване „X-37B“ OTV е изпълнил осем секретни мисии с нарастваща продължителност, като шестата достига 908 денонощия. Осмата му мисия, започнала на 21.08.2025 г., е със засекретена продължителност и продължава повече от година и в наши дни (към месец октомври 2026 г. включително).

Водеща роля в геополитическото противопоставяне между Изтока и Запада в Космоса има космическото разузнаване, като съперничеството в тази сфера се осъществява [3] чрез три вида спътникови разузнавателни системи – фиг. 7.



Фиг. 7. Класификация на спътниковите разузнавателни системи

Военните спътници за наблюдение използват предимно НОО, а някои техни представители – средни околоземни орбити. В съответствие със съществуващите виждания на водещите космически държави тези КЛА са с две предназначения – оптикоелектронно разузнаване (ОЕР) и радиолокационно разузнаване (РЛР). Съвременните спътници за ОЕР и РЛР използват модерни оптически сензори и бордни радиолокационни станции със синтезирана апертура (БРЛС СА или SAR), осигуряващи изображения с висока и свръхвисока пространствена разделителна способност (около и под 1 m). Понастоящем най-известни от тези КЛА са сателитите КН-11, КН-12, Misty, Lacrosse, TOPAZ и др. (САЩ), Персона, Раздан, Барс, Лиана/Пион, Нейтрон и др. (Русия) и Yaogan YW, Хайвангсин и др. (Китай).

Значителна част от съвременните комерсиални КЛА за наблюдение, отбелязващи понастоящем значим подем, са с двойно предназначение (фиг. 7). Подразделят се на спътници за оптикоелектронно наблюдение (ОЕН) и радиолокационно наблюдение (РЛН). Информационните им възможности се приближават до тези на военните сателити за наблюдение главно по пространствена разделителна способност на изображенията. Най-известните понастоящем комерсиални КЛА за ОЕН и РЛН са сателитите WorldView и WorldView Legion на компанията Vantor, Black Sky, Capella, Umbra Lab, ICEYE и др. (основно САЩ), Ресурс-П, Кондор, Обзор-Р и др. (Русия) и Gaofen, Hongtu, Ludi Tance, Jilin-SAR (Цзилин) и др. (Китай). При това **комерсиалните спътници за наблюдение с двойно предназначение съществено допълват военните спътници за наблюдение на САЩ, Русия, Китай и други водещи космически държави,** т. к. последните осигуряват не повече от 30% от целия обем информация с разузнавателен характер [4]. По такъв начин комерсиалните сателити също така участват в геополитическото противопоставяне в Космоса между Изтока и Запада.

През последните 10–15 години съществено място сред сателитите с различно предназначение заемат МКЛА, решаващи широк спектър от военни и граждански задачи. Появата на тези спътници с маса до 500 kg е обусловено по ред причини, сред които водещата е от инженерно-технически характер – все по-високата степен на миниатюризация на електронните елементи, бързото развитие на елементната база, напредъкът в механичните системи, батериите и сензорите, намаляването на електрическата консумация. Към средата на 2026 г. от около 15 400 действащи спътника в околоземна орбита над 2/3 са МКЛА. Така например, Финландската стартъп-компания „ICEYE“ създава съзвездие от микросателити за РЛН от серията „ICEYE“ с двойно предназначение с маса по-малка от 100 kg, оборудвани с БРЛС СА в X-диапазона. Получените радиолокационни изображения са с пространствена разделителна способност в диапазона 0,5–1 m на пиксел. Към средата на 2026 г. тази орбиталната конфигурация разполага с 49 действащи спътника от разглежданата серия, а средната периодичност на наблюдение на обекти и райони е до три часа в глобален мащаб.

Според проучване на космическия изследовател и аналитик Барт Хендрикс [7] Русия използва малки спътници за ОЕР, включително МКЛА за ОЕР „Эмка“ и „Разбег“, осигуряващи високоточни изображения на различни обекти.

Типичен пример на геополитическо противоборство в Космоса е войната в Украйна (2022–2026 г.). Така например, използването на информацията, осигурявана от микросателитите за РЛН от серията „ICEYE“ показва, че тези КЛА с двойно предназначение успешно решават и военни задачи. По официална информация /8/ за времето на използване от страна на украинските въоръжени сили (ВС) в този конфликт до 2025 г. на спътниците от серията „ICEYE“, чрез тези сателити са направени 4 173 снимки на руски обекти, от които на 370 летища; 238 позиции на ПВО и на електронното разузнаване, 153 нефтобази и складове с гориво; 147 склада за ракетно, авиационно въоръжение и боеприпаси и на 17 военноморски бази, като около 38% са използвани за подготовка на огневи удари по разузнатите обекти.

Интерес представлява факта, че във военния конфликт в Украйна успешно са реализирани подходи за противодействие на качеството и вида на получаваните спътникови радиолокационни изображения от сателити за РЛН от страна на руските ВС [3, 9]. В първия случай системи за радиоелектронна борба (РЕБ) успяват да неутрализират (засветят) определени сектори на получаваните радиолокационните изображения от сателитите за РЛН от серията „ICEYE“ или „Sentinel-1“, превръщайки ги в непригодни за космически мониторинг и анализ на обекти в съответния засветен район. Във втория случай системи за РЕБ формират аномални трансформации в отразените радиолокационни сигнали на сателитите „Umbra“ от наблюдаваните обекти, например, на руски бомбардировачи, разположени на летище. В резултат се създават изображения на тези самолети, не отговарящи на реалните им геометрични характеристики. Най-вероятно от страна на Русия се реализира нов камуфлажен способ за радиолокационна защита на различни военни обекти.

По отношение използваните в конфликта от страна на Украйна сателити за ОЕР и ОЕН руският лазерен комплекс „Пересвет“ [3] в редица случаи успешно ги заслепява. По такъв начин

прилагането на нови методи на електронно въздействие е елемент на противопоставянето в Космоса между РФ и САЩ във военния конфликт в Украйна.

В съответствие с фиг. 7 спътниковите системи за електронно разузнаване (ЕР) се подразделят на космически системи за комуникационно разузнаване (радиоразузнаване) и за радиотехническо разузнаване (на радиолокационни и радионавигационни станции). Най-известните понастоящем спътникови системи за комуникационно разузнаване са Ferret, Jumpseat и SHARP (САЩ), Олимп и Лиана/Лотос (Русия), както и Qianshao (Китай), а от спътниковите системи за радиотехническо разузнаване – Ferret, White Cloud, SHARP и SBWASS-CP ((САЩ), Целина и Лиана/Лотос-С (Русия), както и Цзянбин и Yaogan – по тройки спътници (Китай). Посочените спътникови системи са в непрекъснато противоборство с комуникационните, радиолокационни и радионавигационни средства на противостоящата страна от гледна точка, съответно на прехващане на излъчваните от тях сигнали, както и откриване на тези средства и запис на излъчваните сигнали. Материалите за спътниковите системи за ЕР не са публични, т. к. характеристиките им са строго класифицирана информация.

В съответствие с фиг. 7 СРзС за ранно откриване старта на БР и на ядрени взривове (ЯВ) по своята същност са стратегически системи за ранно предупреждение.

Неедноkратно, особено в периода на Студената война, поради индикация на радарите на спътниковите системи за ранно откриване старта на БР на лъжливи цели с различен характер, светът е бил пред термоядрена катастрофа. Най-известните понастоящем такива системи са SBIRS/STS, OPIR, HBTSS и PWSA (САЩ), единната космическа система „Купол“ със спътници за ранно предупреждение „Тундра“ (Русия), както и космическата система „Тонсин Цзишу Шиян“ със спътници за ранно предупреждение „Цианшао“, „Хоян“ и „TJS“. Според някои СМИ последните наблюдават позиционните райони на ракетните формирования на САЩ.

Спътниковите системи за ранно откриване на ЯВ са предназначени за контрол и засичане координатите на епицентровете на ЯВ на повърхността на Земята, в атмосферата и в космическото пространство. Типичен пример в това отношение е регистрирането на 22.09.1979 г. от американската система „Vela Hotel“ на двойно светлинно пробляскване, характерно за ЯВ в атмосферата, в района на остров Принц Едуард в Индийския океан. Оказва се, че Израел и ЮАР са тествали ядрено оръжие с вероятна мощност 2-3 kt.

Понастоящем за решаването на подобни задачи САЩ и Русия използват специална бордова апаратура със сензори (детектори), монтирана на навигационни спътници от системите GPS (апаратура GBD) и ГЛОНАСС (апаратура „Лира“). По такъв начин се осигурява информация за мястото, мощността и височината на ЯВ по цялото земно кълбо. Всичко това прави невъзможно провеждането на ЯВ в горепосочените три среди без същите да бъдат регистрирани от съответните системи. Според средствата за масова информация (СМИ) апаратура за откриване на ЯВ е монтирана и на някои американски и руски спътници за ЕР.

Появата на МКЛА е тясно свързано **със следващата кулминация на геополитическото съперничество в Космоса между Изтока и Запада през второто десетиление на XXI век – създаването на спътниците-инспектори (СИ).** Същите са обикновено МКЛА, предназначени за следене и инспектиране на чуждестранни КЛА (наблюдение, обследване, проверка, заснемане, прихващане на сигнали, създаване на смущения или намеса в предаването на данни, дори „извличане“ на информация) с последващо предаване на получената информация в наземен център. Според американските виждания в съвременни условия СИ решават задачи на т. н. ситуационна осведоменост.

В резултат на развитието на високите технологии и на маневрените способности на КЛА създаването и използването на СИ става възможно, след като сближението, маневрирането и скачването в околоземна орбита на КЛА се превръщат в напълно рутинни операции в световната космонавтика. Това от своя страна изисква СИ да разполагат и използват двигателна установка, както и наличие на борда на запаси от работно тяло (гориво и окислител). Особено активно водещите космически държави (САЩ, Русия и Китай) използват СИ за следене на други сателити през третото десетилетие на XXI век [4], което е поредна стъпка в космическата конфронтация. Поради това информацията за инспекционните възможности и за конкретните характеристики на тези специализирани КЛА е класифицирана, често сведенията имат ориентировъчен и приблизителен, а в редица случаи и противоречив характер. Според СМИ най-известните СИ на САЩ са от сериите „GSSAP“, „HEMESIS“ и „CLIO“, на Русия – по програмите „Нивелир“, „Нумизмат“ и „Буревестник“, а на Китай – спътници от сериите „Chuang Xin“ и „Shiyan“. Регистрирани са и случаи сателити с друго предназначение, например китайския комерсиален спътник за наблюдение „Цзилин-1“, да се сближава с американски сателит от серията „WorldView Legion“ и извършва заснемането му.

От страна на спътниковите комерсиални комуникационни системи на настоящия етап едно от най-активно развиващите се направления са нискоорбиталните многоспътникови конфигурации за широколентов достъп до Интернет в рамките на земното кълбо, главно в

труднодостъпни места и в такива със слабо развита инфраструктура. Американският супермилиардер Илон Мъск чрез компанията „Space-X“ поетапно разгръща **системата „Starlink”** – нискоорбитална мрежа от сателити, летящи на височини 335–614 km, чийто брой трябва да достигне до 42 000 КЛА до края на третото десетилетие на XXI век. **Войната в Украйна (2022–2026 г.) показва, че сателитните конфигурации „Starlink“ имат значими военни приложения,** като с тяхна помощ се решават редица военни задачи – осигуряване на надеждна комуникация между армейските подразделения; насочване на оръжия, т. е. превръщане на класическите артилерийски и ракетни средства във високоточни; управление от далечно разстояние на безпилотни летателни апарати камикадзета и морски дронове – камикадзета, включване на модули за ЕР в състава на полезния товар на сателитите „Starlink“ и др. От тази гледна точка **войната в Украйна (от месец февруари 2022 г. до наши дни) е първият голям военен конфликт, в който комерсиалните космически технологии играят важна роля в хода на бойните действия между противостоящите страни, а следователно и в геополитическото противопоставяне между Изтока и Запада.**

В условията на военния конфликт между Русия и Украйна ускорено се развива руската голяма частна компания „Бюро 1440“, предназначена за комерсиално широколентова предаване на данни на висока скорост на основата на нискоорбитална спътникова конфигурация „Рассвет“. Тази система е аналог (но не копие) на системата „Starlink“. Първите 16 серийни спътника „Рассвет-3“ са изведени в орбита на 23.03.2026 г., а вторият пакет от 16 КЛА „Рассвет-3“ – на 19.07.2026 г. Първите тестове с клиенти успешно преминават през 2026 г. Според СМИ към месец септември 2026 г. спътниковата конфигурация „Рассвет“, при наличие на наземни терминали, осигурява поне два „комуникационни прозореца“ дневно над територията над Украйна, всеки от които продължава малко над един час. По мнение на западни космически специалисти след извеждането в околоземна орбита от Русия на 12–15 пакета по 16 спътника от серията „Рассвет“ ще се постигне денонощно покритие на зоната на бойните действия във военния конфликт между Русия и Украйна. Тази спътникова конфигурация е планирано да започне комерсиалната си експлоатация през 2027 г., когато се създаде съзвездие от 292 сателита, като целта е до 2035 г. техният брой да достигне 924 КЛА.

Съгласно теорията на конфликтологията последствията от съперничеството в Космоса могат да доведат до реализиране на противоположната стратегия на основните участници в противоборството – сътрудничество, като превърнат космическото пространство в област на равноправно и взаимоизгодно взаимодействие. Най-характерни примери на космическо сътрудничество между Изтока и Запада [1] са съвместният съветско-американски полет „Союз-Apollo“ (в скачено състояние) през месец юли 1975 г. и поддържането на МКС след 2011 г. със смесени екипажи и систематични полети на руски и американски пилотируеми и товарни КК.

Намаляването на надпреварата във въоръжаването между Изтока и Запада е основно условие за стратегическа стабилност, международно сътрудничество и недопускане на по-нататъшната милитаризация на Космоса.

Литература:

1. Мардиросян, Г. Въведение в космонавтиката, С., изд. На БАН „проф. Марин Дринов“, 2023 г., стр.144–173.
2. Минкова, П. Преходът от цифровия век към хибридната цивилизация. С., книг. къща „ТРУД“, 2025, стр. 60-63, 68–76.
3. Пенев, П. Военни аспекти на използването на космоса, С., Изд. на БАН „проф. Марин Дринов“, 2025 г., стр. 312, 340–342, 359–377.
4. Пенев, П. Нови направления в развитието на военнокосмическите системи. МНК „SPACE ECOLOGY SAFETY“, 2022, стр. 100–107
5. Савиных, В. Космическая сфера военных действий. Образовательные ресурсы и технологии, 2015, кн. 3 (11), с. 96–103.
6. Хозин, Г.Великое противостояние в космосе (СССР-США), М., Вече, 2001 г.
7. The Space Review, Bart Hendrickx.
8. https://topwar.ru/245604-sbit-razvedyvatelnye-sputniki-sich-2-30-i-iceye.htm
9. https:/news-cr.ru/other/2026/07/28/393878.html

МОТОРНО-ВИТЛОВИ ГРУПИ ЗА КВАДРОПЛАН

Павлин Граматиков[1], Джулиан Тахов[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Д Аероспейс
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com

Ключови думи: *хибридни безпилотни летателни апарати, вертикално излитане и кацане, квадроплан, бордни системи, управление на полета, дрон за картографиране, индустриален дрон*

Резюме: *В статията са описани особеностите, проектирането, моделирането и управлението на квадроплани, съчетаващи квадрокоптер и летателен апарат с неподвижно крило. Анализиран е полета на квадроплани при режими на висене, крейсерски полет и преходен полет.*

MOTOR-PROPELLER UNITS FOR A QUADPLANE

Pavlin Gramatikov[1], Dzhulian Tahov[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]D Aerospace
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com

Keywords: *hybrid unmanned aerial vehicles, vertical take-off and landing quadcopter, onboard systems, flight control, mapping drone, industrial drone,*

Abstract: *The article describes the characteristics, design, modeling, and control of quadplanes aircraft that combine a quadcopter with a fixed-wing configuration. It analyzes quadplane flight during hovering, cruising, and transition phases.*

Въведение

Терминът "квадроплан" или квадросамолет (QuadPlane) в авиацията има две значения:

Исторически квадроплан: Това е самолет от началото на 20-ти век с четири крила, разположени едно над друго. Използва рядка и остаряла аеродинамична схема, в експериментални или ранни военни самолети (1916 г.).

Модерен квадроплан (VTOL): В днешно време, "квадроплан" се нарича хибриден БЛА (безпилотен летателен апарат), който съчетава крило на самолет с роторна система на квадрокоптер. Модерният квадроплан (наричан Lift+Cruise или VTOL) използва две отделни двигателно-витлови системи, за различни режими от полета. Представлява хибриден БЛА, комбиниращ вертикално излитане и кацане (VTOL) с полет на фиксирано крило.

А. Група за вертикален полет (Lift Motors)

Тази група отговаря за излитането, кацането и задържането във въздуха (hover).

Конфигурация: Обикновено включва 4 (или повече) мотора, разположени на рамена (както при квадрокоптер). Витлата им създават тяга надолу.

Предназначение: Осигуряват вертикална тяга, независима от крилото. Това позволява на квадроплана да излита и каца без писта.

Характеристики: Тези мотори често са с по-голям диаметър на витлата и по-нисък KV (обороти на волт), за да генерират максимална тяга при ниска скорост. Те са "излишен товар" по време на хоризонтален полет и увеличават съпротивлението и теглото на квадроплана.

Б. Група за хоризонтален полет (Cruise/Pusher Motor)

Тази група отговаря за движението напред и ефективния полет по маршрут.

Конфигурация: Обикновено това е един (или два) двигател, монтиран в предната (теглителна) или задната (бутаща) част на фюзелажа. Витлото е разположено хоризонтално.

Предназначение: Осигурява хоризонтална тяга, която позволява на крилото да генерира подемна сила. Самолетният режим е много по-енергийно ефективен и позволява по-висока скорост и далечина на полета.

Характеристики: Този двигател е оптимизиран за висока скорост и ефективност при крейсерски полет, а не за максимална тяга.

Технически характеристики и управление на квадроплан

Управление: Преходът между двете групи (транзиция) е критична фаза. Докато вертикалните мотори намаляват тягата, а крилото започва да поема тежестта, автопилотът (например ArduPilot или PX4) трябва плавно да управлява и двете системи.

Разположение: Моторните групи могат да бъдат фиксирани или наклоняеми (tilt-rotor) [6]. При фиксираните (както е класическият квадроплан) вертикалните мотори са винаги насочени нагоре, което е по-просто, но те създават допълнително въздушно съпротивление.

Видове двигатели, конфигурации и пропелери за квадроплан

А. Видове двигатели за квадроплан*:*

А1.Outrunner двигатели: Характерно за тях е: роторът се върти около статора; по-висок въртящ момент при по-ниски обороти: идеални за директно задвижване на пропелери; По-добри за VTOL режим (вертикално излитане/кацане)

А2. Inrunner двигатели: Специфично е: роторът е вътре в статора; по-високи обороти (RPM); подходящи за скоростни полети; изискват редуктор за пропелери

Б. Конфигурация на моторите: *Видовете са:* Quad (4 мотора) – най-популярна конфигурация; Hexa (6 мотора) – повишена надеждност; Octa (8 мотора) – за тежки товари; Tilt motors – накланящи се мотори за по-ефективен преход между режими [6].

В. Видове пропелери

В1. За VTOL мотори (вертикален полет):

- Ниска стъпка (low pitch)
- Голям диаметър: 7–12 in
- Оптимизирани за теглителна сила (thrust)
- По-висока ефективност при ниски скорости
- Осигуряват стабилност при излитане и кацане

В2. За основния пропелер (хоризонтален полет):

- Висока стъпка (high pitch): 6–10 in
- По-малък диаметър в сравнение с VTOL пропелерите
- Оптимизирани за скорост и ефективност
- Pusher (бутач) или Puller (теглещ) тип

В3. Специални пропелери:

Характерно е, че използват променлива стъпка (Variable Pitch):

- Автоматична адаптация между VTOL и cruise режим
- По-висока ефективност в двата режима
- По-сложни и скъпи

Г. Конфигурации за задвижване

Г1. Стандартна QuadPlane:

- 4 VTOL мотора в X-конфигурация
- 1 отделен мотор за хоризонтален полет (pusher/puller)
- VTOL моторите се изключват при преход към самолетов полет

Г2. Tilt-QuadPlane: [6]

- Накланящи се VTOL мотори (0–90°)
- Един и същи мотор за вертикален и хоризонтален полет
- По-сложна механика, но по-ефективна

Експериментални и заводски квадроплани

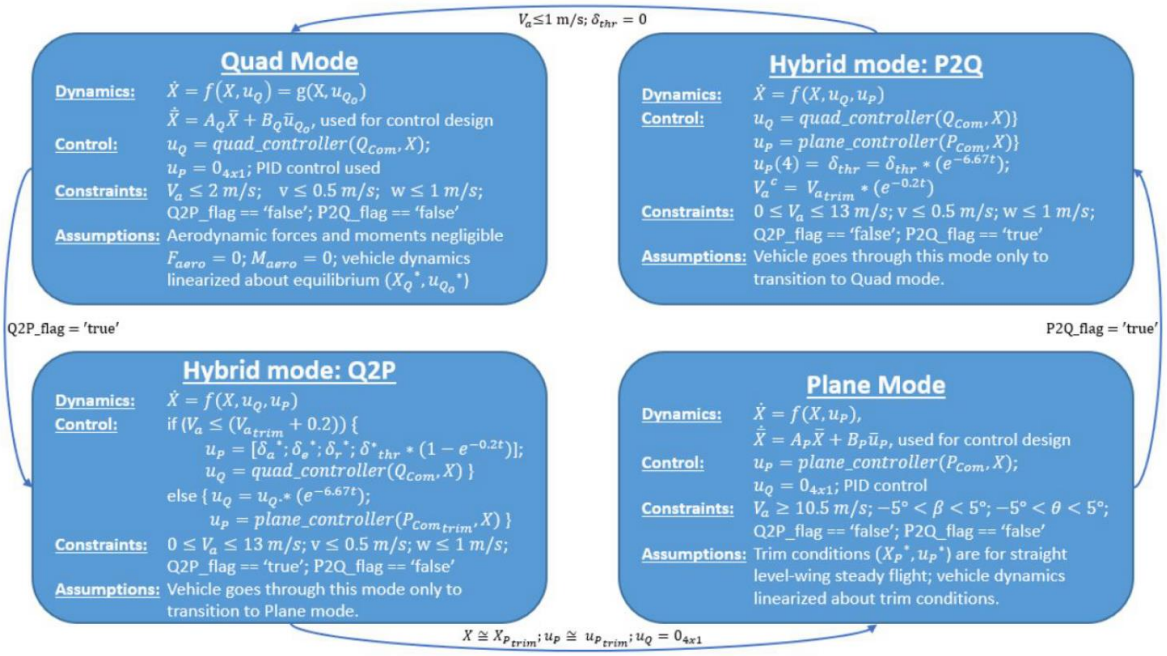
На фиг. 1 [1] е дадена хибридна система на квадроплан. Тя има четири режима на работа, виж фиг. 2 [1]. Това са квадрокоптерен режим; преходен режим от квадрокоптер към самолет (Q2P); самолетен режим и преходен режим от самолет към квадрокоптер (P2Q). Обикновено продължителността на Q2P е значително по-малка от P2Q.



Фиг. 1. QuadPlane [1]



Фиг. 2. Прототип от балса/композитен материал [1]



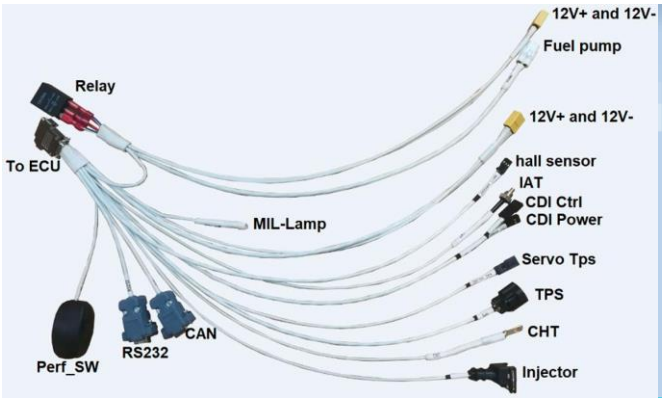
Фиг. 3. Модел на контролер на хибридна система с четири режима [1]

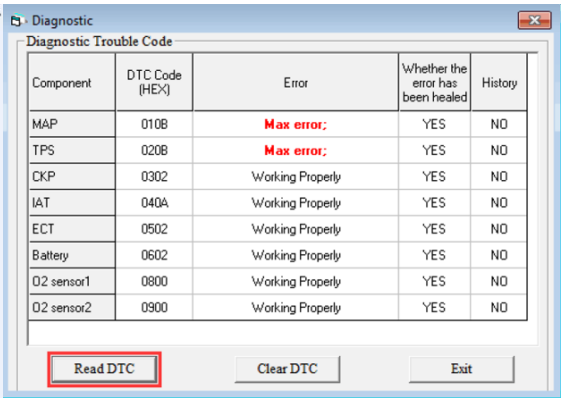
Да разгледаме един продукт на производителя YANGDA: Sky Whale Max Hybrid Heavy Lift Long Endurance VTOL Drone с тегло 25 kg [2]. Той има четири електрически мотора за режим квадрокоптер, използващи 30 in пропелер CF Propeller CW&CCW и един бензинов двигател 120cc EFI Engine Auto-starter & alternator с пропелер 26 in Wood CW за самолетен режим. Използва летателен контролер CUAV X7+ Pro с диференциален GPS. За комуникация се използват: радио контролер Futaba T6K V3S; 4G LTE и Starlink. Има 4 акумулаторни батерии: за роторите 3 броя 14S 10000 mAh HV Lipo и 1 брой 6S 16000 mAh Li-ion за авиониката. Резервоарът е за 18 L и позволява до 4 h продължителност на полета при полезен товар 15 kg и 10 h при 2 kg. Максималното излетно тегло (MTOW) е 65 kg, дължината на крилото е 4 m, дължината на самолета е 2,58 m, а височината е 0,85 m. Теглото без батерии и гориво е 37,5 kg. Круизната скорост е 85-100 km/h, максималната скорост е 130 km/h. Квадропланът е устойчив на вятър до 43,2 km/h. Максималната височина на полет е 4200 m.

Ако бензиновият двигател се замести с електрически, квадропланът позволява до 1,5 h продължителност на полета при полезен товар 10 kg; 2 h при 6 kg; и 3,5 h при 2 kg.

Системата за електронно впръскване на гориво (EFI, electronic fuel injection) е компютърно управляван метод за подаване на прецизно дозирано количество гориво към двигателя, който заменя механичните карбуратори. Да разгледаме силовата и управляващата електроника и електронното впръскване на гориво на бензинов двигател 120cc EFI Engine Auto-starter & alternator [4, 5]. Върху кабелния сноп на EFI системата е разположен превключвател за подкачване на гориво (Perf-SW, prime switch виж фиг. 4). Той ръчно активира EFI системата за впръскване на малко количество гориво преди стартиране на двигателя. Когато Perf-SW се поставя в позиция „I“ се впръсква малка доза гориво. Впръскването се извършва еднократно, дори ако превключвателят остане в позиция „I“.

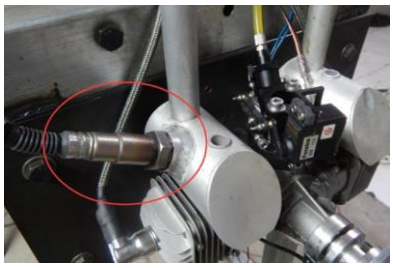
Електронният блок за управление (ECU, Electronic Control Unit, виж фиг. 10) може да отчита стойността на ламбда (AFR, виж фиг. 5) от контролера за широколентова сонда със сензор LSU4.9 (ALM); Отчитането на ламбда в реално време позволява настройка на горивните карти на EFI системата. Датчикът за температурата на цилиндровата глава (CHT, виж фиг. 9) се монтира на цилиндровата глава, в близост до запалителната свещ. Може също така да се постави под запалителната свещ.



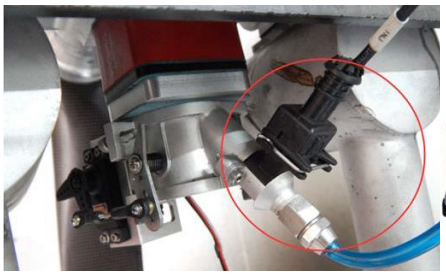


Фиг. 4. Система на бензинов двигател 120cc EFI

Фиг. 12. Проверка на бордната система чрез EcoCAL



Фиг. 5. Свързване на ламда сонда



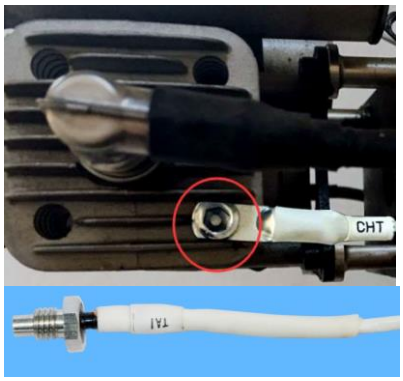
Фиг. 6. Свързване на инжектор



Фиг. 7. Свързване на TPS сензор



Фиг. 8. Електронно запалване CDI



Фиг. 9. Сензори CHT и IAT



Фиг. 10. Блок за управление ECU

Сензорът за температура на входящия въздух (IAT, виж фиг. 9) измерва температурата на въздуха, постъпващ в двигателя. Тъй като студеният въздух е по-плътен от горещия, ECU непрекъснато регулира подаването на гориво въз основа на сигнала от сензора, за да поддържа оптимално съотношение въздух-гориво при различни работни условия.

Параметрите на ECU са: алуминиев корпус с ниско тегло 120 g общо; компактен размер 78x64x20 mm; конектор тип mini-D (37 пина); вграден барометричен сензор с автоматична компенсация спрямо надморската височина; управление на двигатели с 1 или 2 цилиндъра (контрол както на впръскването на гориво, така и на запалването) и поддръжка на CAN шина).

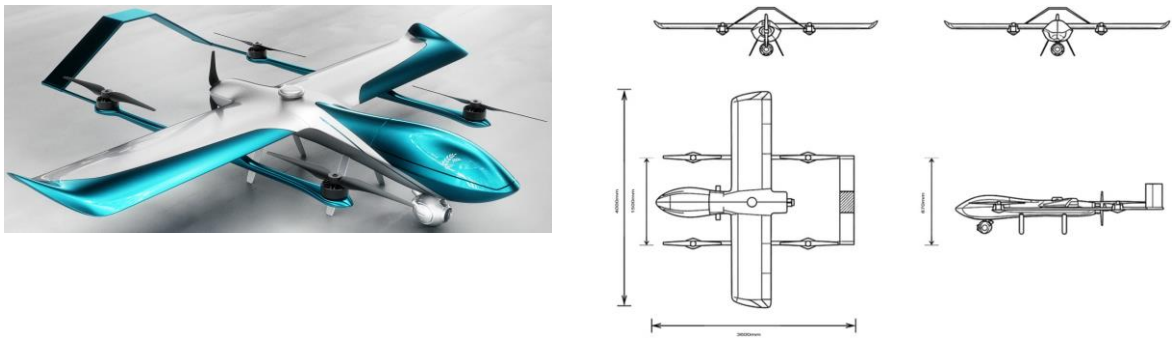
След свързване към лаптоп се чрез софтуера EcoCAL се визуализират следните параметри, виж фиг. 11 и фиг. 12. При подаване на команди: Read DTC: Go to Menu à Diagnostics -> ECU Diagnostics Click "Read DTC": Click "Clear DTC" се извършва диагностика на бордната система, виж фиг. 12.



Фиг. 11. Визуализация чрез софтуера EcoCAL

Двигатели, пропелери и акумулаторна батерия за квадроплан до 52 kg излетна маса

За авторски квадроплан с излетна маса до 52 kg (виж фиг. 13) са избрани в X-конфигурация 4 броя VTOL мотори V807 KV170 от производителя T-Motor [3]. Препоръчителните пропелери са G27 × 8,8; G28 × 9,2 и G29 × 9,5.



Фиг. 13. Квадроплан до 4 h полет и до 250 km разстояние [11]

Таблица 1. Спецификации на V807 KV170 12S Vtol Brushless Drone Motor с три пропелера [2]

Test Data

Item No.	Prop	Throttle	Voltage (V)	Thrust (g)	Torque (N*m)	Current (A)	RPM	Inputpower (W)	Efficiency (g/W)	Operating Temperature ℃)
V807 KV170	G27*8.8	40%	47.76	4047	1.39	10.41	2732	497.06	8.14	107℃ (Ambient Temperature: 22℃)
		45%	47.69	5059	1.7	13.75	3021	655.5	7.72	
		50%	47.57	6445	2.17	19.81	3383	942.21	6.84	
		55%	47.42	7792	2.56	26.23	3699	1243.82	6.26	
		60%	47.3	9125	2.94	32.61	3993	1542.46	5.92	
		65%	47.06	10968	3.47	43.88	4362	2065.07	5.31	
		70%	46.9	12248	3.84	52.04	4602	2440.62	5.02	
		75%	46.69	13716	4.28	62.32	4867	2909.41	4.71	
		80%	46.49	14969	4.67	71.51	5077	3324.48	4.5	
		90%	46.04	17604	5.45	92.79	5445	4271.76	4.12	
		100%	45.52	19849	6.12	116.62	5785	5308.27	3.74	
	G28*9.2	40%	47.73	4372	1.56	11.04	2698	527.22	8.29	128℃ (Ambient Temperature: 22℃)
		45%	47.65	5443	1.88	14.75	2988	702.9	7.74	
		50%	47.52	6915	2.37	21.39	3346	1016.23	6.81	
		55%	47.37	8307	2.77	28.13	3659	1332.57	6.24	
		60%	47.25	9702	3.17	34.67	3943	1637.97	5.92	
		65%	47.09	11073	3.57	42.37	4199	1995.01	5.55	
		70%	46.82	12865	4.11	55.21	4538	2584.99	4.98	
		75%	46.61	14442	4.56	65.73	4784	3063.87	4.71	
		80%	46.4	15717	4.95	75.55	4983	3505.38	4.48	
		90%	45.93	18275	5.74	97.82	5345	4492.59	4.07	
		100%	45.34	20721	6.46	124.56	5649	5647.55	3.67	
	G29*9.5	40%	47.69	5070	1.87	12.97	2620	618.39	8.2	HOT
		45%	47.59	6276	2.24	17.37	2897	826.77	7.59	
		50%	47.42	7916	2.84	25.28	3240	1199.04	6.6	
		55%	47.26	9558	3.34	33.51	3554	1584.03	6.03	
		60%	47.08	11083	3.82	42.4	3819	1996.3	5.55	
		65%	46.93	12433	4.23	49.99	4042	2346.17	5.3	
		70%	46.62	14312	4.83	65.04	4338	3032.08	4.72	
		75%	46.33	15888	5.31	78.22	4552	3624.2	4.38	
		80%	46.09	17138	5.71	89.68	4727	4133.43	4.15	
		90%	45.54	19498	6.46	115.33	5024	5251.58	3.71	
		100%	44.71	20997	6.93	151.7	5200	6782.02	3.1	

Notes：Motor temperature is the motor surface temperature aftering running at 80% for 10 mins. (Based on T-MOTOR test bench(es), all data are for reference only. T-MOTOR reserves the right of final interpretation.)

Отделните тегла са: 55 g за пропелер G28 × 9,2; 650 g за мотор V807; 150 g за проводници; 279 g за контролер на скоростта ESC Flame 180A 12S V2.0. Общо една мотор витлова група тежи 650 + 150 + 55 + 279 = 1134 g. От таблицата на производителя при газ (throttle) 70% и напрежение на батерията 46,82 V моторът V807 има статична тяга 12865 g; ток на консумация 55,21 A; въртящ момент 4,11 N/m; обороти 4538 RPM; консумация 2584,99 W и ефективност 4,98 g/W. Очаква се при излетна маса 12865 * 4 = 51460 g общата консумация на 4 мотора V807 да е 2584,9 * 4 = 10339 W и общ ток 55,21 * 4 = 220,84 A при напрежение на батерията 46,82 V. Предлагат се две силнотокови батерии Daerospace 12S 12 Ah, за квадрокоптерната част и 1 брой 6S 16 Ah за самолетната част. За полетно време при две батерии Daerospace 12 Ah 12s с енергия 46,82 * 12 * 2 = 1123,68 Wh се получава 1123,68 / 10339 = 0,10868 h или 6,5208 min, при C = 220,84 / 24 = 9,2. Коефициентът на запас по тяга отчитен по табл. 1 (съответно при газ 100% и 70%) има стойност 20721 / 12865 = 1,61065, която е по-нисък от желания 2 или повече. Предлага се използването на гъвкав силиконов кабел 12AWG между батериите и моторите, със сечение 4 mm², с ток до 88 A и тегло 0,1 kg/m. За проводниците съгласно фиг. 13 общата дължина е 4 * 1,546 + 4 * 1,115 = 10,644 m и общото тегло е 10,644 * 0,1 = 1,0644 kg. За бензинов двигател се предлага от китайския производител DLE (DL Engine) модел DLE 111 с параметри: обем 111,2 cm³; мощност 11,2 hp при 7 500 RPM и статическа тяга 25,5 kg на морско ниво [12]. Препоръчани пропелери са 27 × 10; 26 × 12 и 28 × 10, 28 × 12.

Заключение

Анализирани са характеристиките на двигатели и пропелери на квадроплани, съчетаващи квадрокоптер и летателен апарат с неподвижно крило. При сравнение на времето на полета един и същ квадроплан, задвижван от бензинов и електрически двигател за хоризонтална тяга при 2 kg полезен товар е получено съотношение 10 / 3,5 = 2,857 в полза на бензиновия. За VTOL мотор V807 KV170 е избран пропелер G28 × 9,2 и две батерии 12Ah 12s, и е изчислено време за полет в квадрокоптерен режим до 6,5 min.

Литература:

1. Mathur, Akshay, and Ella M. Atkins. "Design, modeling and hybrid control of a quadplane." In *AIAA Scitech 2021 Forum*, p. 0374. 2021, pp. 1–16. https://doi.org/10.2514/6.2021-0374, https://www.researchgate.net/publication/348254161_Design_Modeling_and_Hybrid_Control_of_a_QuadPlane
2. https://www.yangdaonline.com/yangda-sky-whale-max-hybrid-heavy-lift-long-endurance-vtol-drone/
3. https://store.tmotor.com/product/v807-vtol-motor.html
4. https://infinject.com/wp-content/uploads/2024/09/INF-DA120-UAV-EFI-Engine-Specifications.pdf
5. https://www.ecotrons.com/files/UAV%20engine%20EFI%20installation%20manua-DLE120_V1.9.pdf
6. Mancinelli, Alessandro, Bart DW Remes, Guido CHE de Croon, and Ewoud JJ Smeur. "Unified incremental nonlinear controller for the transition control of a hybrid dual-axis tilting rotor quad-plane." IEEE Transactions on Robotics 41 (2024): 306–325. DOI: 10.1109/TRO.2024.3498372, https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10752979
7. Павлин Граматиков, Райчо Тодоров. Проектиране и параметри на работещ при екстремални условия електрически квадрокоптер. Proceedings SES'2022, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2022, ISSN:p-ISSN 2603-3313 e-ISSN 2603-3321, 108–114. http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/4_Gramatikov.pdf
8. Павлин Граматиков, Джулиан Тахов. Моторно-витлови групи и акумулаторни батерии за хексакоптер. Сборник доклади от годишна университетска научна конференция, Технически науки, Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски”, Велико Търново, 2023, ISSN:2367-7481, 1447–1457. https://www.researchgate.net/publication/371494900_MOTORNO-VITLOVI_GRUPI_I_AKUMULATORNI_BATERII_ZA_HEKSAKOPTER_MOTOR-PROPELLER_GROUPS_AND_RECHARGEABLE_BATTERIES_FOR_HEXACOPTER
9. Павлин Граматиков, Райчо Тодоров. Летателни и електрически параметри на X8 октокоптер с излитане и кацане от водни басейни. Proceedings SES'2022, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2022, ISSN:p-ISSN 2603-3313 e-ISSN 2603-3321, 115–120. http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/5_Gramatikov.pdf
10. Павлин Граматиков. Изследване на характеристиките на полета на безпилотни електрически квадрокоптери. Proceedings SES'2021, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2021, ISSN:p-ISSN 2603-3313 e-ISSN 2603-3321, 108–113.
11. https://d-aerospace.com/
12. https://www.dlengine.com/en/rcengine/dle111

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

ПРОГНОСТИЧЕН МОДЕЛ ЗА АДАПТИВНО РАДИОЕЛЕКТРОННО ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ НА РОЯЦИ БЛА ЧРЕЗ МНОГОКАНАЛНА КАЛМАНОВА ФИЛТРАЦИЯ

Филип Илиев, Георги Сотиров

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: fgi@mail.bg; GSotirov@mail.space.bas.bg

Ключови думи: *многоканална Калманова филтрация, краткосрочно прогнозиране, анализ на иновациите, прогнозна неопределеност, адаптивно радиоелектронно противодействие, рояци БЛА*

Резюме: *Предлага се прогностичен модел, обединяващ многоканална Калманова филтрация, диагностична обработка и краткосрочно прогнозиране като информационна основа за адаптивно радиоелектронно противодействие на рояци БЛА. Прогнозната оценка се допълва с информация за нейната неопределеност и съгласуваността на измерванията с модела. Симулационното сравнение между базов и еталонен филтър показва значението на правилното шумово описание за точността и достоверността на прогнозната неопределеност.*

A PREDICTIVE MODEL FOR ADAPTIVE ELECTRONIC COUNTERMEASURES AGAINST UAV SWARMS USING MULTI-CHANNEL KALMAN FILTERING

Filip Iliev, Georgi Sotirov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: fgi@mail.bg; GSotirov@mail.space.bas.bg

Keywords: *multi-channel Kalman filtering, short-term prediction, innovation analysis, prediction uncertainty, adaptive electronic countermeasures, UAV swarms*

Abstract: *A predictive model is proposed that integrates multi-channel Kalman filtering, diagnostic processing, and short-term prediction to provide an information basis for adaptive electronic countermeasures against UAV swarms. The predicted state estimate is supplemented with information on its uncertainty and the consistency of the measurements with the model. A simulation-based comparison between baseline and reference filters demonstrates the importance of accurate noise modelling for prediction accuracy and the validity of the associated uncertainty estimates.*

Въведение

Адаптивното радиоелектронно противодействие на рояци безпилотни летателни апарати (БЛА) изисква обработка на информация с различна точност и наличност във времето. Повишеният измервателен шум и прекъсванията на данните налагат съвместно разглеждане на оценяваното състояние, неговата неопределеност и съгласуваността на измерванията с модела.

Многоканалната Калманова филтрация позволява обединяване на измерванията и рекурсивно оценяване на състоянието [1, 2]. Настоящата работа допълва тези функции с диагностика и краткосрочно прогнозиране в обща структура и изследва чрез симулационен сценарий влиянието на шумовото описание и наличността на данните върху прогнозния резултат.

1. Постановка на задачата за многоканално оценяване и прогнозиране

Разглежда се оценяване и прогнозиране на динамичен процес чрез измервателни канали с различна точност и наличност на данните. Под измервателен канал се разбира информационен поток към оценяващата система.

1.1. Модел на динамичната система и многоканалните наблюдения

За теоретична основа се приема линейна дискретна стохастична система с многоканални наблюдения:

(1) $$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{y}_{i,k} = \mathbf{H}_{i,k}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_{i,k}, \quad i = 1, \dots, M.$$

Тук ($\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$) е векторът на състоянието в момент k; $\mathbf{F}_k$ е матрицата на прехода; $\mathbf{w}_k$ е процесният шум с нулева средна стойност и ковариационна матрица $\mathbf{Q}_k$. Процесният шум описва случайните отклонения спрямо приетия динамичен модел. Матрицата $\mathbf{H}_{i,k}$ свързва състоянието с наблюдаваните величини в i-тия канал, а $\mathbf{v}_{i,k}$ е измервателният шум с нулева средна стойност. Броят на каналите е M.

Приема се, че процесният шум и общият вектор на измервателните шумове са бели във времето. Процесният шум е некорелиран с измервателните шумове, а всички шумове са некорелирани с началната грешка на оценяване. Допускат се корелации между измервателните шумове на различните канали в един и същ времеви момент. Началната оценка на състоянието и ковариационната матрица на грешката ѝ се задават съответно чрез $\hat{\mathbf{x}}_{0|0}$ и $\mathbf{P}_{0|0}$.

Наличните измервания се представят чрез общ векторен модел на наблюденията $\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$. Матрицата $\mathbf{R}_k = \mathrm{Cov}(\mathbf{v}_k)$ отчита измервателната неопределеност и междуканалните корелации и е блоково-диагонална при некорелирани измервателни шумове. Пренебрегването на съществуващи корелации може да доведе до подценяване на грешката на общата оценка. Възможността за възстановяване на състоянието зависи от наблюдаемостта на системата чрез наличната последователност от измервания.

1.2. Рекурсивно оценяване и прогнозиране на състоянието

Калмановата филтрация изпълнява едностъпкова прогноза по динамичния модел и корекция чрез измерванията [2]. Прогнозната оценка и ковариацията на грешката ѝ са:

(2) $$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \quad \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}.$$

Разликата между действителното и прогнозираното измерване формира иновацията $\boldsymbol{\nu}_k$, чиято ковариационна матрица е $\mathbf{S}_k$:

(3) $$\boldsymbol{\nu}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \quad \mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k.$$

При обратима матрица $\mathbf{S}_k$ Калмановото усилване и коригираната оценка се определят чрез:

(4) $$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^T\mathbf{S}_k^{-1}, \quad \hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k\boldsymbol{\nu}_k.$$

За актуализиране на ковариационната матрица на грешката на оценяване се използва формата на Джоузеф, подходяща за числена реализация [2]:

(5) $$\mathbf{P}_{k|k} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k\right)\mathbf{P}_{k|k-1}\left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k\right)^T + \mathbf{K}_k\mathbf{R}_k\mathbf{K}_k^T.$$

Тук $\mathbf{I}$ е единичната матрица. При линейния модел, съвместно гаусови начално състояние и шумове и правилно зададени статистически характеристики Калмановата оценка минимизира средноквадратичната грешка.

При постоянни матрици $\mathbf{F}$ и $\mathbf{Q}$ прогнозата за h стъпки без междинни измервателни корекции е:

(6) $$\hat{\mathbf{x}}_{k+h|k} = \mathbf{F}^h\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \quad \mathbf{P}_{k+h|k} = \mathbf{F}^h\mathbf{P}_{k|k}\left(\mathbf{F}^h\right)^T + \sum_{j=0}^{h-1}\mathbf{F}^j\,\mathbf{Q}\left(\mathbf{F}^j\right)^T.$$

При скаларния модел със случайни изменения и единичен коефициент на преход прогнозната оценка съвпада с текущата оценка на състоянието, а прогнозната дисперсия нараства с натрупването на процесния шум.

1.3. Надеждност на измерванията и диагностична информация

За оценка на съгласуваността между измерванията и прогнозираното им поведение се използва нормализираната квадратична иновация за отделния канал [3]:

(7) $$d_{i,k} = \boldsymbol{\nu}_{i,k}^T\mathbf{S}_{i,k}^{-1}\boldsymbol{\nu}_{i,k}.$$

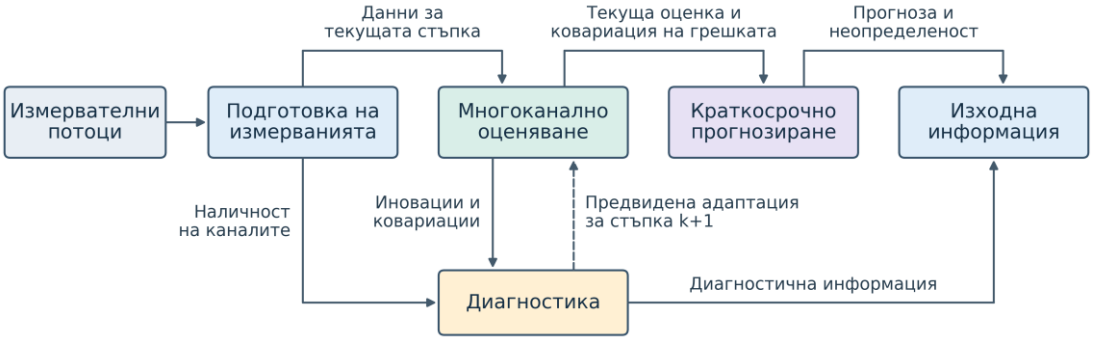
Тук $\boldsymbol{\nu}_{i,k}$ е частта от общата иновация, съответстваща на i-тия канал, а $\mathbf{S}_{i,k}$ е съответният диагонален блок на $\mathbf{S}_k$ от (3). Иновациите се определят спрямо общата прогнозна оценка преди измервателната корекция. Показателят отчита отклонението спрямо очакваната му неопределеност; повишената му стойност показва несъответствие с модела, но сама по себе си не доказва отказ на канала.

2. Структура и принцип на действие на прогностичния модел

Предлаганият модел обединява многоканалното оценяване, диагностичната обработка и краткосрочното прогнозиране като информационна основа за адаптивно вземане на решения.

2.1. Функционална структура и информационни връзки

Моделът включва подготовка на измерванията, многоканално оценяване, диагностика и краткосрочно прогнозиране (фиг. 1). Входните данни съдържат измервателните вектори, времевите им отметки и индикаторите за наличност. Моделите, шумовите ковариации и началните условия са определени в точка 1.



Фиг. 1. Функционална структура на прогностичния модел

Подготовката на измерванията осигурява времевата им съгласуваност и формира общия измервателен вектор и съответните матрици само за наличните канали, като запазва приетите междуканални корелации. Липсващите измервания се изключват от корекцията, без да се заменят с нулеви стойности.

Многоканалното оценяване изпълнява едностъпковата прогноза и измервателната корекция съгласно (2)–(5) и предоставя текущата оценка, ковариацията на грешката, иновациите и техните ковариации. При липса на всички измервания се изпълнява само прогнозната стъпка [4].

Диагностичният блок анализира съгласуваността на измерванията с прогнозираното им поведение, като отчита наличността на каналите и развитието на отклоненията във времето. Структурата предвижда диагностичната информация от момент k да подпомага адаптирането на оценяващата процедура за момент $k+1$. В настоящата симулационна проверка диагностичните показатели се проследяват самостоятелно, а параметрите се задават според базовия и еталонния сравнителен вариант.

Блокът за краткосрочно прогнозиране използва текущата оценка и ковариацията на нейната грешка за определяне на състоянието в избран бъдещ хоризонт съгласно (6). При постъпване на нови измервания прогнозата се обновява. Към изхода се добавя съпровождащата диагностична информация.

2.2. Диагностична информация и принципи на адаптация

Индикаторът $a_{i,k}$ приема стойност 1 при налично измерване от i-тия канал в момент k и 0 при липсващо. Нормализираната квадратична иновация $d_{i,k}$ от (7) се изчислява само при налично измерване и не се заменя с нула при липса на данни. Така наличността се разграничава от съгласуваността на измерванията с модела.

За номиналния линеен гаусов модел, при правилно зададени статистически характеристики и положително определена ковариационна матрица на иновацията, е изпълнено [3]:

(8) $$d_{i,k} \sim \chi^2_{m_i}, \quad \mathbb{E}\left[d_{i,k}\right] = m_i.$$

Тук m_i е размерността на измервателния вектор и броят степени на свобода на хи-квадрат (χ^2) разпределението. Зависимостта в (8) е статистическа основа за оценка на съгласуваността между измерванията и модела. Показателят $d_{i,k}$ е безразмерен и не представлява вероятност за изправност на канала.

Диагностичната интерпретация отчита големината и продължителността на отклоненията. Отклонение в един канал насочва към проверка на неговите измервания, а съгласувани отклонения в няколко канала – и на динамичния модел. Отчитат се междуканалните зависимости и възможните общи източници на измервателна грешка. При

недостатъчни основания причината за отклонението остава неопределена, вместо автоматично да се приписва на отказ на канал.

Адаптивни подходи използват обновяване на измервателната ковариация [5] и анализ на нормализираните иновации [6]. Разграничаването между липсващи данни и несъответствия на измервателния или динамичния модел подпомага последващото развитие на адаптацията. При реализиране на диагностичната обратна връзка следва да се оценят влиянието на едностъпковото закъснение и съгласуваността на изчислените ковариации с действителните грешки. Номиналното разпределение в (8) не се приема автоматично за запазено при адаптивно изменение на параметрите.

2.3. Формиране и интерпретация на прогнозния резултат

Прогнозният резултат включва оценката на вектора на състоянието $\hat{\mathbf{x}}_{k+h|k}$ и ковариационната матрица на прогнозната грешка $\mathbf{P}_{k+h|k}$, определени по (6). Оценката описва състоянието в момент $k+h$ въз основа на информацията до момент k. Хоризонтът h е брой дискретни стъпки, съответстващ на времеви интервал $h\Delta t$, където Δt е периодът на дискретизация.

Диагоналните елементи на ковариационната матрица са дисперсиите на грешките, а извъндиагоналните – ковариациите между тях. Стандартното отклонение за дадена компонента е квадратният корен от съответната дисперсия.

Диагностичната информация допълва ковариационното описание с данни за наличността и съгласуваността на измерванията. Прогнозният хоризонт се избира съобразно динамиката на процеса, неопределеността и валидността на модела, а прогнозата се използва при съвместно отчитане на оценката, нейната неопределеност и диагностичната информация.

3. Постановка на симулационния сценарий и методика за проверка

В симулационния сценарий три измервателни канала с различна измервателна неопределеност предоставят наблюдения на нормализираното отклонение на общ тестов сигнал спрямо зададено опорно ниво. Еталонното състояние се задава при генерирането на сценария и се използва единствено за оценка на резултатите, без да се предоставя на филтъра.

За симулацията се приема скаларен модел със случайни изменения:

(9) $$x_{k+1} = x_k + w_k, \quad w_k \sim \mathrm{N}(0, q), \quad y_{i,k} = x_k + v_{i,k}, \quad v_{i,k} \sim \mathrm{N}(0, r_i), \quad i = 1,2,3.$$

Тук q е дисперсията на процесния шум, а r_i – номиналната дисперсия на измервателния шум в съответния канал. Шумовете са взаимно независими гаусови последователности с нулеви средни стойности. Началното състояние се генерира независимо от шумовете, а параметрите и началните условия са обобщени в табл. 1.

Таблица 1. Основни параметри на симулационната постановка

Параметър	Стойност
Период на дискретизация и продължителност	$\Delta t = 1$ условна единица време; 600 стъпки
Брой измервателни канали и независими реализации	3 канала; 200 реализации
Дисперсия на процесния шум	$q = 0{,}0004$
Номинални измервателни дисперсии	r_1 = 0,0016; r_2 = 0,0036; r_3 = 0,0064
Начални условия	$x_0 \sim \mathrm{N}(0; 0{,}01)$; $\hat{x}_{0\|0} = 0$; $P_{0\|0} = 0{,}01$
Прогнозен хоризонт	h = 5 стъпки

Проверката включва четири сценария – **C0:** номинален режим; **C1:** деветкратно увеличаване на измервателната дисперсия във втория канал; **C2:** прекъсване на измерванията от втория канал; **C3:** прекъсване на измерванията от всички канали. Нарушенията се въвеждат за стъпки 201 до 300 включително, след което номиналните условия се възстановяват. При **C1** действителната дисперсия във втория канал през този интервал е 0,0324.

Сравняват се два варианта на многоканалния Калманов филтър. **Базовият вариант** използва номиналните измервателни дисперсии през цялата реализация. **Еталонният вариант** използва действителните дисперсии, включително промяната при **C1**, и служи като сравнителен ориентир при точно известни шумови характеристики.

За избрания хоризонт грешката на прогнозата се определя чрез:

(10) $$\mathbf{e}_{k,h} = \mathbf{x}_{k+h} - \hat{\mathbf{x}}_{k+h|k} \ .$$

Тук $\mathbf{x}_{k+h}$ е еталонното състояние, а $\hat{\mathbf{x}}_{k+h|k}$ е прогнозната оценка, получена с информацията до момент k. Точността се характеризира чрез корена от средната квадратична грешка (RMSE), осреднена по времевите моменти и независимите реализации:

$$\text{(11)} \qquad \mathrm{RMSE}(h) = \sqrt{\frac{1}{LN}\sum_{s=1}^{L}\sum_{k\in\mathcal{K}}\left(e_{k,h}^{(s)}\right)^2}, \quad N = |\mathcal{K}|.$$

Тук L е броят на независимите реализации, s обозначава съответната реализация, а $\mathcal{K}$ е множеството от N разглеждани моменти на формиране на прогнозата с налично съответстващо еталонно състояние. При хоризонт от пет стъпки (h = 5) допустимите моменти са от 1 до 595 включително. За кривите на прогнозната грешка осредняването се извършва само по реализациите за всеки отделен момент.

Съгласуваността на прогнозната неопределеност с действителните грешки се проверява чрез нормализираната квадратична прогнозна грешка:

$$\text{(12)} \qquad \varepsilon_{k,h} = \frac{e_{k,h}^2}{P_{k+h|k}}.$$

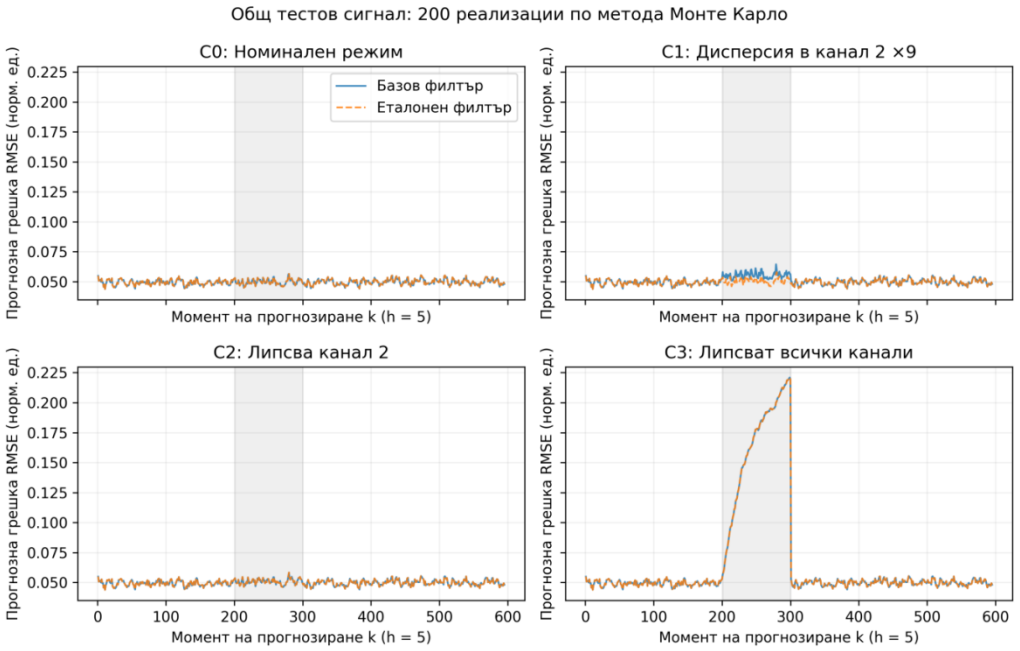
Тук $P_{k+h|k} > 0$ е прогнозната дисперсия на грешката. При нулева средна грешка и правилно определена нейна дисперсия очакваната стойност на показателя е единица. Допълнително се оценява емпиричното покритие на номиналните 95% прогнозни интервали – делът на случаите, в които еталонното състояние попада в интервала, определен от прогнозната оценка плюс и минус 1,96 стандартни отклонения.

Във всяка реализация двата филтъра използват еднакви измервания и начални условия. Между сценариите се запазват общи еталонни траектории и стандартизирани шумови последователности, върху които се прилагат съответните изменения на дисперсията и наличността. Началната стойност на генератора на случайни числа е 20261009.

Резултатите се анализират преди нарушението, по време на него и след възстановяването на номиналните условия. Статистическата неопределеност на обобщените показатели се оценява по независимите реализации, без последователните времеви грешки да се приемат за независими наблюдения. За уточняване на статистическото покритие при **C3** е проведена допълнителна независима проверка с 5000 реализации и начална стойност на генератора 20261010. Резултатите от нея се представят отделно от основната серия.

4. Симулационни резултати

На фиг. 2 е представено изменението на прогнозната грешка (RMSE) при условията от точка 3. Стойността във всяка точка от кривите е изчислена по независимите реализации за съответния момент на формиране на прогнозата.



Фиг. 2. Прогнозна грешка на базовия и еталонния филтър при номинален режим, повишен измервателен шум и прекъсване на измерванията (сценарии C0–C3). Сивата област обозначава стъпки 201–300

В табл. 2 се представя RMSE, изчислена по (11) за прогнозите, формирани през стъпки 201–300. За съпоставимост същият интервал се използва и при номиналния сценарий.

Таблица 2. Прогнозна грешка през стъпки 201–300

Сценарий	RMSE – базов филтър	RMSE – еталонен филтър
C0 – номинален режим	0,04981	0,04981
C1 – повишен шум във втория канал	0,05556	0,05068
C2 – прекъсване на втория канал	0,05084	0,05084
C3 – прекъсване на всички канали	0,16882	0,16882

При номинален режим двата филтъра дават еднакви резултати, тъй като използват идентични модели и шумови характеристики. Получената RMSE е близка до теоретичната установена стойност 0,04946 за избрания модел и прогнозен хоризонт.

При **C1** базовият филтър подценява измервателната неопределеност във втория канал. Еталонният отчита увеличената дисперсия и постига приблизително 8,8% по-ниска RMSE за разглеждания интервал. Средната нормализирана квадратична прогнозна грешка е 1,262 за базовия и 1,016 за еталонния филтър при теоретична очаквана стойност единица.

При **C2** оценяването продължава чрез останалите два канала и прогнозната грешка нараства умерено. При **C3** измервателната корекция отпада и грешката нараства значително, а след възстановяване на данните се връща близо до номиналното ниво. В двата сценария филтрите дават еднакви резултати, тъй като използват еднаква налична информация и шумови характеристики.

При **C3** емпиричното покритие на номиналните 95% прогнозни интервали е 90,6% за основните 200 реализации. Допълнителната независима проверка с 5000 реализации дава покритие 94,9% и средна нормализирана квадратична прогнозна грешка 0,993. Тези резултати подкрепят статистическата съгласуваност на модела и показват значението на броя независими реализации при продължителна липса на измервания.

Заключение

Предложеният модел обединява многоканалното оценяване, диагностичната информация и краткосрочното прогнозиране в обща структура. Симулационната проверка показва значението на правилното шумово описание и наличността на данните за точността и достоверността на прогнозната неопределеност. Резултатите създават основа за последващо реализиране и проверка на диагностична обратна връзка за адаптивно определяне на шумовите характеристики. Бъдещото развитие включва разширяване към многомерни модели и корелирани измервания, както и проверка с реални данни за оценка на приложимостта.

Благодарности: Настоящият доклад е изготвен в рамките на проект по зад. 3.1.7 от Националната научна програма „Сигурност и отбрана“ (приета с ПМС №731 от 21.10.2021 г.) и съгласно Споразумение № Д01-74/19.05.2022 г. между МОН и Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров“.

Литература:

1. Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35–45.
2. Simon, D. *Optimal State Estimation: Kalman, H∞, and Nonlinear Approaches*. Wiley-Interscience, 2006.
3. Piché, R. Online tests of Kalman filter consistency. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2016, vol. 30, no. 1, pp. 115–124.
4. Sinopoli, B., L. Schenato, M. Franceschetti, K. Poolla, M. I. Jordan, S. S. Sastry. Kalman filtering with intermittent observations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, vol. 49, no. 9, pp. 1453–1464.
5. Chhabra, A., J. R. Venepally, D. Kim. Measurement noise covariance-adapting Kalman filters for varying sensor noise situations. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 24, article 8304.
6. Kinatas, H., C. Hajiyev. Adaptive fault-tolerant multiplicative attitude filtering for small satellites. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2025, vol. 39, no. 1, pp. 152–162.

FORESIGHT METHOD IN THE SUDEM PROJECT AND FUTURE PROJECTS

Georgi Georgiev[1], Dimo Zafirov[2]

[1]Georgi Georgiev-Consulting GmbH
[2]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: georgi@georgiev-consulting.de; zafirov@big97.com

Keywords: *Foresight method, Unmanned Aerial Systems, Positioning, Navigation, Timing, AI agent*

Abstract: *In the implementation of the SUDEM project of the EU Erasmus+ program, the Foresight method was used to determine the promising technologies used. At the same time, it was reported that the method works statically and slowly, and this publication proposes to modernize it for its updating and rapid forecasting.*

FORESIGHT МЕТОД ЗА ПРОЕКТ SUDEM И БЪДЕЩИ ПРОЕКТИ

Георги Георгиев[1], Димо Зафиров[2]

[1]Georgi Georgiev-Consulting GmbH
[2]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: georgi@georgiev-consulting.de; zafirov@big97.com

Ключови думи: *Foresight метод, безпилотни летателни системи, позициониране, навигация и времева синхронизация, AI агент*

Резюме: *При изпълнението на проекта SUDEM по програма „Еразъм+“ на ЕС беше използван Foresight метод за определяне на перспективни технологии. Същевременно беше отчетено, че този метод функционира статично и бавно, поради което в настоящата публикация се предлага неговата модернизация с цел актуализиране и осигуряване на възможност за бързо предвиждане.*

Introduction

In the implementation of project KA220-HED-2EF8D879 SUstainable Disaster and Emergency Management processes digitization (SUDEM) of the EU Erasmus+ program, the Foresight method was used to determine the promising technologies used. At the same time, it was reported that the method works statically and slowly, and this publication proposes to modernize it for its updating and rapid forecasting.

The project creates and validates an innovative interdisciplinary model for knowledge transfer in the field of higher education, with a focus on the digitalization of the entire life cycle of disaster and emergency management.

The international team integrates principles of practice and education from all relevant fields, including risk and disaster monitoring and management, decision-making support, disaster response management, artificial intelligence, Internet of Things (IoT), data science, remote sensing (satellites and drones), data aggregation and data management. SUDEM aims to equip students with the skills needed to effectively manage relevant extreme events and the consequences of disasters, as well as to improve emergency processes. The overall goal for Europe is to create a group of disaster management experts with a strong enough focus on digital tools through which the loss of human life and infrastructure caused by disasters will be significantly reduced in the long term.

The project brings together a consortium of leading European organisations in the field of higher education and research, using international cooperation to align academic programmes with

the requirements for optimal disaster management, including decision-making support. SUDEM focuses on the creation of adaptable and accessible educational modules that can be implemented in different higher education and lifelong learning organizations. A key component of SUDEM is the developed Foresight study, a key element of the project's methodology, which presents the identified requirements, challenges and solutions. It allows for the elaboration and delivery of an appropriate system architecture and an optimal scenario for future development, including a higher education framework on disaster management processes, policy recommendations and, finally, a unique package of knowledge and training – all as key results of the SUDEM project.

Methods and materials

Foresight is a systematic method of investigating possible future developments, technological trends, risks and opportunities in order to make better decisions in the present. Unlike ordinary forecasting, Foresight does not necessarily look for one exact future, but explores several possible scenarios.

Milestones:

1. Horizon Scanning – Detect emerging technologies and early signals of change.
2. Trend Analysis — analysis of technological, economic and societal trends.
3. Drivers and Uncertainties — identifying the factors driving change and the main unknowns.
4. Scenario Development – development of possible scenarios for the future.
5. Expert Delphi — systematic collection and analysis of expert assessments through several rounds.
6. Impact Assessment – assessment of potential consequences and risks.
7. Strategic Recommendations – formulation of recommendations and action plans.

The Foresight process may include:

- Identification of AI, UAV, satellite surveillance and Digital Twins as technological areas;
- analysis of their maturity and limitations;
- Delphi research among experts;
- Development of scenarios for future development;
- Setting priorities for research and training.

Foresight does not predict the future with certainty, but helps us prepare for various possible future developments.

Modernizing the Foresight method

When using the Foresight method in the SUDEM project, it was reported that it is static – applied at the beginning of the project, the results obtained from it do not change until its completion, while in dynamic processes significant changes will occur. Obtaining and processing expert opinions requires considerable time, which is not always available. Therefore, in the recommendations for future activities, it was recommended to explore opportunities for its modernization.

Static vs. Dynamic Foresight

The main difference is that static Foresight explores the future within a particular study, while dynamic Foresight continuously updates estimates and scenarios as new significant information emerges [1]. Other differences are given in Table 1.

Table 1

Criterion	Static Foresight	Dynamic Foresight
Approach	One-time or periodic examination	Continuous process
Data	Data at a certain point in time	Constantly incoming data
Analysis	Pre-planned	Adaptive
Scenarios	They are developed within the framework of the study	Updated when conditions change
Expert assessments	One or more pre-planned rounds	Repeated assessments in new circumstances
Role of AI	Analyzes available data	Keeps track of changes and supports updates
Result	Strategic report or roadmap	Updated forecast and recommendations

For the implementation of dynamic Foresight research, a system is needed that periodically analyzes new scientific publications, technological developments, data and up-to-date expert assessments. The Foresight Horizon Scanning AI agent was developed, which constantly monitors and signals the occurrence of verified significant information related to the research carried out. If necessary, the research manager takes actions to update the forecasts and scenarios. The result is an adaptive system for strategic forecasting. This allows to significantly improve the volume of horizon scanning and reduce the duration of project implementation [2].

Dynamic Foresight + AI Architecture:

- data collection
- horizon scanning
- ai analysis
- trend change detection
- foresight scenarios
- expert delphi review
- updated forecast
- strategic recommendations
- cycle repetition

The AI agent can:

- discovers new trends;
- identify forward-looking statements that need to be reviewed;
- prepares new questionnaires;
- compares the assessments between the different rounds;
- calculates changes in consensus.

The cycle can be run monthly, quarterly, or when a significant event occurs. The frequency depends on the area and the data available.

It is possible to develop **Dynamic Delphi**, where expert assessments are updated periodically or as new evidence becomes available.

It is important to preserve the independence of experts, anonymity and the history of assessments. Not every new information imposes a new Delphi round.

According to the authors of the article, a hybrid model is suitable for future projects: Static Foresight + Dynamic Foresight:

- First stage: conducting basic Delphi research and developing scenarios.
- Second stage: building an AI agent to monitor technology trends.
- Third stage: periodic update of forecasts through expert assessment.
- Stage four: tracking changes in risks and strategic priorities.

Thus, the basic research provides a stable methodological basis, and the dynamic component allows adaptation to the new conditions.

Conclusion

Static Foresight creates a strategic starting point. and dynamic Foresight keeps that strategy up to date.

The integration of Dynamic Foresight, AI, and periodic Delphi analysis is a promising research concept that can be verified through a pilot system and measurable quality criteria.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge support for the development and publication of this article from the Erasmus+ programme, project KA220-HED-2EF8D879 SUstainable Disaster and Emergency Management processes digitization (SUDEM).

References:

1. Axel Sikora, Lechosław Tomaszewski, Mehmet Aksit. Dimo Zafirov, Petar Lulchev, Miglena Raykovska, Ivan Georgiev, Georgi Georgiev Enabling Sustainable Disaster Management Through AAM and ACS: A Dynamic Strategic Foresight on IoT-Supported System of Systems *Appl. Sci.* 2026, *16*(9), 4360; https://doi.org/10.3390/app16094360
2. Caroline I. Samson-Onuorah, Felix Adebayo Bakare Dynamic Strategic Foresight Using Predictive Business Analytics: Modeling Competitive Advantage Under Volatile Market and Technological Conditions. May 2025 International Journal of Research Publication and Reviews 6(5):1044-1060 DOI:10.55248/gengpi.6.0525.1627

HYBRID UAV ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Georgi Georgiev[1], Dimo Zafirov[2]

[1]*Georgi Georgiev-Consulting GmbH*
[2]*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences*
e-mail: georgi@georgiev-consulting.de; zafirov@big97.com

Keywords: *Hybrid Intelligence, Drones, Positioning, Navigation & Timing, AI Agents*

Abstract: *Hybrid UAV Intelligence is an intelligent computing architecture that integrates various artificial intelligence methods, physical models, sensory data, and logic rules in order to achieve reliable perception, decision-making, planning, and autonomous UAV functioning. The main idea is to combine learnable models with physical knowledge and formalized logic so that the system can adapt to changing conditions while respecting predetermined safety limits.*

ХИБРИДЕН ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ НА БОРДА НА БЕЗПИЛОТЕН ЛЕТАТЕЛЕН АПАРАТ

Георги Георгиев[1], Димо Зафиров[2]

[1]*Georgi Georgiev-Consulting GmbH*
[2]*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките*
e-mail: georgi@georgiev-consulting.de; zafirov@big97.com

Ключови думи: *Хибриден интелект, Безпилотни летателни апарати, Позициониране, навигация и синхронизация по време, AI агенти*

Резюме: *Хибриден интелект за безпилотни летателни апарати представлява интелигентна изчислителна архитектура, която обединява различни методи на изкуствения интелект, физически модели, данни от сензори и логически правила, с цел постигане на надеждно възприемане на средата, вземане на решения, планиране и автономно функциониране на безпилотните летателни апарати. Основната идея е да се съчетаят модели, способни на самообучение, с физически познания и формализирана логика, така че системата да може да се адаптира към променящите се условия, като същевременно спазва предварително зададени граници за безопасност.*

CAD - Computer Added Design
CAM – Computer Added Manufacturing
MBSE - Model Based System Engineering
PNT - Positioning, Navigation, and Timing
R&D Research and Development
SoS – System of Systems
UAV - Unmanned Aerial Vehicle
UAS - Unmanned Aerial System

Introduction

Hybrid UAV Intelligence is an intelligent computing architecture that integrates various artificial intelligence methods, physical models, sensory data, and logic rules in order to achieve reliable perception, decision-making, planning, and autonomous UAV functioning.

The main idea is to combine learnable models with physical knowledge and formalized logic so that the system can adapt to changing conditions while respecting predetermined safety limits.

Materials and methods

Hybrid UAV Intelligence can be represented by five principal components:

Component	Function
Data-Driven Intelligence	Machine learning, deep learning and computer vision
Physics-Based Intelligence	Aerodynamics, flight dynamics and energy modelling
Symbolic Intelligence	Rules, logical reasoning and knowledge representation
Decision Intelligence	Planning, prediction and selection of actions
Planning, prediction and selection of actions	Constraint enforcement, fault handling and operational monitoring

These components interact with the UAV's flight-control system and its digital representation, or Digital Twin.

The PNT (Positioning, Navigation, and Timing) system is used by autonomous unmanned robots to navigate and communicate in manipulated environments.



Fig. 1. Autopilot



Fig. 2. Baseboard Bundle Autopilot and Onboard Computer



Fig. 3. Elements of a PNT System

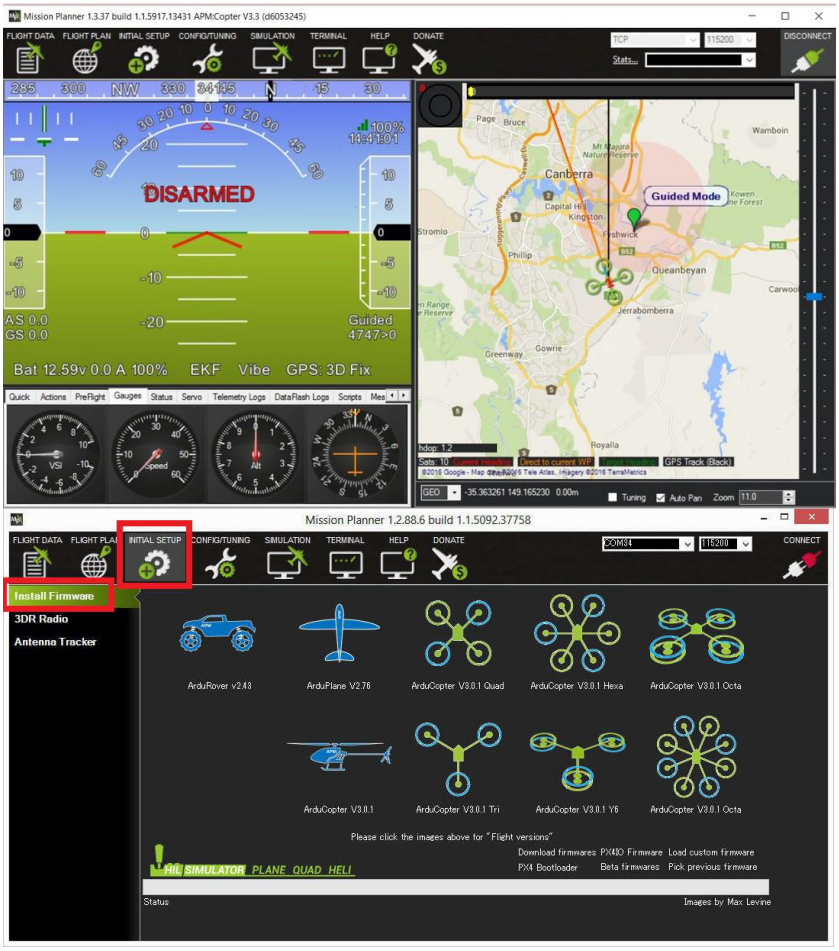


Fig. 4. UAVs Flight Test Software

Research on **positioning, navigation, and timing (PNT) of unmanned aerial vehicles (UAVs)** is aimed at increasing autonomy, absolute accuracy, and resilience in environments challenged or denied by the Global Navigation Satellite System (GNSS).

Assured Positioning, Navigation and Timing (A-PNT)

A-PNT stands for Guaranteed Positioning, Navigation and Weather. It is a combination of technologies and architectural solutions that provide reliable PNT services even in the event of jamming, spoofing GNSS signals or loss of satellite navigation. The A-PNT system is particularly important for autonomous UAVs (Table 1).

Table 1

Characteristics	PNT	A-PNT
Main objective	Positioning, navigation and timing	Support these features for various failures and interference
GNSS	It is often a major source	One of several possible sources
Reservation	Optional	Adaptive
Integrity control	Optional	Essential architectural principle
GNSS Loss Operation	Depends on the components available	Provided by appropriate backup solutions

The basic principle in the operation of A-PNT is the use of multiple complementary sources, instead of complete dependence on GNSS. The specific architecture depends on the requirements of the system.

The main technologies used are:

- GNSS: GPS, Galileo and other satellite navigation systems.
- INS/IMU: inertial navigation and measurement of accelerations and angular velocities.
- Visual-Inertial Odometry: estimating movement via camera and IMU.

- LiDAR/Radar Odometry: estimating movement by laser or radar measurements.
- Iternative Timing: backup time sources and local clocks.
- Integrity Monitoring: assessment of the reliability of the navigation solution.
  It is important to note that none of these components alone guarantee A-PNT.

AI can support:

1. Detection of discrepancies between sensors.
2. Recognition of degraded navigational measurements.
3. The assessment of uncertainty.
4. The choice between eligible navigation solutions.
5. Predicting the probability of loss of navigational reliability.

In critical applications, AI must be supplemented with verifiable integrity control algorithms, error limits, and safe failure behavior.

Hybrid UAV Intelligence can use a multi-agent system to integrate artificial intelligence, sensors, navigation, diagnostics, and UAV lifecycle management into a single architecture. The main idea is for different AI agents to work together, with each responsible for a specific function, and a coordinating agent pooling the results.

The key test indicators are:

- Positioning error;
- Error in orientation assessment;
- Accumulation of odometric drift;
- Failure detection time;
- Duration of operation without gnss;
- Reliability of the integrity assessment;
- Loss or contradiction behavior between sensors.
  The described system will be used in future development of UAS.

Conclusion

A-PNT is not just an alternative to GPS, but an architecture for reliable positioning, navigation and synchronization under different operating conditions.

For Hybrid UAV Intelligence, the most important thing is for the system not only to calculate its position, but also to assess how much it can trust this calculation.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge support for the development and publication of this article from the Erasmus+ programme, project KA220-HED-2EF8D879 SUstainable Disaster and Emergency Management processes digitization (SUDEM).

References:

1. Caroline I. Samson-Onuorah, Felix Adebayo Bakare Dynamic Strategic Foresight Using Predictive Business Analytics: Modeling Competitive Advantage Under Volatile Market and Technological Conditions. May 2025 International Journal of Research Publication and Reviews 6(5):1044-1060 DOI:10.55248/gengpi.6.0525.1627
2. Rubén San-Segundo, Lucía Angulo, Manuel Gil-Martín, David Carraminana and Ana M. Bernardos Hybrid Artificial Intelligence Strategies for Drone Navigation
3. Relative Vessel Motion Tracking using Sensor Fusion, Aruco Markers, and MRU Sensors Modeling, Identification and Control (MIC) 38(2):79-93 DOI:10.4173/mic.2017.2.3, https://www.google.com/search?q=%22Hybrid+Artificial+Intelligence+Strategies+for+Drone+Navigation%22&oq=%22Hybrid+Artificial+Intelligence+Strategies+for+Drone+Navigation%22&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIICAEQABgWGB7SAQoxMjc4OGowajE1qAIIsAIB&sourceid=chrome&source=chrome.rb&ie=UTF-8

ПИРОХИДРАВЛИЧЕН МЕТОД ЗА ПРИНУДИТЕЛНО ОТДЕЛЯНЕ НА ТОВАРИ

Стойко Стойков

Военновъздушна академия на България, Факултет „Авиация“, Долна Митрополия, България
e-mail: sos_23@abv.bg

Ключови думи: *авиация, изтласкване, кръвно налягане, пирохидравличен механизъм*

Резюме: *Разгледан е пирохидравличният метод за принудително отделяне на товари. Оценена е целесъобразността на използване на хидравлична система чрез предварително изчисляване на хидравличната предавка*.

PYROHYDRAULIC METHOD FOR FORCED SEPARATION OF LOADS

Stoyko Stoykov

Faculty Aviation, Bulgarian Air Force Academy, Dolna Mitropolia, Bulgaria
e-mail: sos_23@abv.bg

Keywords: *aviation, thrust, blood pressure, pyrohydraulic mechanism*

Abstract: *he pyrohydraulic method for forced separation of loads is considered. The feasibility of using a hydraulic system is assessed by preliminary calculation of the hydraulic transmission.*

Въведение

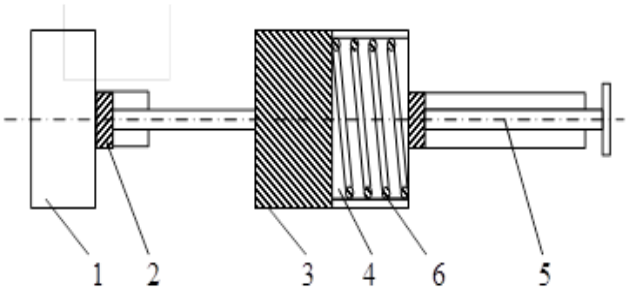
Пирохидравличният метод за принудително отделяне на товари е комбинация от пиротехнически и хидравлични системи за безопасно и контролирано отделяне на товари от самолети. Безопасността на отделянето се постига чрез създаване на такава начална линейна и ъглова скорости, които изключват сблъсъка на товара със самолета и поддържат пространствена стабилност.

Предимства на този метод са: адаптивност към външните влияния; повишена скорост на отделяне в сравнение с пневматичните системи поради използването на работен флуид в хидравличните системи; може да се комбинира с други системи – използването на хидравлични тласкачи подобрява контрола върху процеса на отделяне на товара.

Недостатъци са: ограничена адаптивност към вътрешни фактори (ъгловата скорост на товара спрямо центъра на масата е зададена постоянна във всички режими на полета, а линейната скорост на центъра на масата няма максимално допустима стойност, което може да доведе до нестабилност на системата за стабилизиране на товара); повишени изисквания за безопасност (пиротехническите механизми, използвани в такива системи, налагат специални изисквания за работа и безопасност).

Специфичните предимства и недостатъци могат да варират в зависимост от конкретното внедряване на системата, вида на товара и условията на работа.

За увеличаване броя на сработванията на пиротехническата система без да се почиства и за подобряване на експлоатацията се използва хидравлична система, като междинно звено между камерата на горене и пръта на тласкача. Изпълнението на такава схема (фиг. 1) ще концентрира разпространението на газа в камерата на горене, поради което ще се почиства нагара само в камерата.



Фиг. 1. Схема на пирохидравличен задвижващ механизъм [3]
1 – камера на горене; 2 – бутало; 3 – хидравлично бутало; 4 – камера с хидравлична течност;
5 – тласкач; 6 – възвратна пружина

Теория на метода

При задействане на пиропатрона, в пиротехническата камера се увеличава налягането, задвижва се буталото 2, което действа на хидравличното буталото 3 и се изтласква течността в хидравличния цилиндър, която от своя страна задвижва буталото на тласкача 5. Връщане на системата в начално положение се извършва под действието на свитата пружина 6 след падане на налягането в пиротехническата камера 1.

За оценяване на целесъобразността от използване на хидравлична система се извършва предварително изчисляване на хидравличната предавка. Площта на тласкача се определя по известната формула:

(1) $S_m = \pi d^2/4.$

От условието за осигуряване на ускорение, площта на тласкача е:

(2) $S_m = F/P_x$, (P_x е хидравличното налягане, F – силата на налягане) се получава

(3) $$P_x = \frac{F}{S_т} = 80\ \text{MPa}$$

Обемът на течността на тласкача се изчислява по формулата:

$V = S_m l$, където l е хода на тласкача.

При 20 mm ход на хидравличното бутало, неговата площ се определя от израза:

(4) $S_б = V/0,2.$

Радиусът на хидравличното бутало е:

(5) $$R_x = \sqrt{\frac{S_x}{\pi}} = 2.10^{-2}\text{m}.$$

За осигуряване на хидравличното налягането P_x е необходима сила F:

$F = P_x.S_б.$

Площта на пиротехническото бутало за средно налягане p = 90 MPa в камерата на горене, се изчислява по формулата:

(6) $S_п = F/P.$

Радиусът на буталото се определя по известната формулата:

(7) $$R_п = \sqrt{\frac{S_п}{\pi}} = 1,9.10^{-2}\text{m}.$$

От следната формула [3]:

$$\delta = \frac{P.D_c}{(2,3[\sigma] - P)\varphi} + C,$$

се изчислява дебелината на хидравличния цилиндър,

където φ е коефициента на якост (0,5);
P – налягането в хидрокамерата;
D – вътрешен диаметър на цилиндъра;
C – добавка към изчислената дебелина на стената (2 mm);
[σ] – допустимо напрежение на материала на цилиндъра.

За изчисляване по горните формули за стойностите за хода на тласкача *l,* силата на тласкача *F* и диаметъра на буталото на тласкача *d* се приемат тези, както са за пиротехническата система на заключващия механизъм на стандартен държател (ключалка) [3]:

L = 83 mm; *F* = 25000 *N; d* = 20 mm.

Получени са следните резултати:
$S_m = 3{,}14.10^{-4}\ mm^2$
$P_x = 80MP_a$
$V = 2{,}6.10^{-5}\ m^3.$
$S_б = 1{,}3.\ 10^{-2}\ m^2$
$R_x = 2.10^{-2} m^2$
$F = 1{,}04.10^5\ N$
$S_п = 1{,}15.\ 10^{-3}\ m^2$
$R_п = 1{,}9.10^{-2}\ m$

От изчисленията се получава:
- диаметъра на хидравличното бутало е $D_x = 40\ mm;$
- диаметъра на пиротехническия цилиндър е $D_п = 38\ mm$;
- диаметъра на буталото на тласкача, $d = 20\ mm$.

Дебелината на хидравличния цилиндър е около 5 mm.

Съгласно получените данни, масата на пиротехническия хидравличен задвижващ механизъм е около 7 – 8 kg. Данните са получени без да се отчита коефициента на полезно действие (КПД) на хидросистемата. С отчитане на КПД, който е не повече от 0,6 (триене в уплътненията, силата на свиване на възвратната пружина, изтичането на газ, хидравличните съпротивления) всички параметри ще се увеличават, включително габаритите и масата на цялата система. Освен това при работа на хидравличния механизъм се получава изтичане на течност.

Заключение

Най-рационалната схема на установка на авиационното въоръжение с адаптивна система за принудително отделяне е конструкция с два работни тракта – газов и хидравличен, с регулиране на параметрите на изтласкване на товара по изпълнителния хидравличен тракт. Основната разлика на тази схема от други възможни системи е, че управлението се осъществява не чрез газове, а чрез хидравлична смес. Предимството на регулирането на течност в тези случаи пред регулирането на газ е, че е за предпочитане регулирането да се извършва чрез течност поради нейната не свиваемост. Освен това за нея съществуват стандартни регулиращи серво клапани, които могат да се използват в конструкцията на адаптивната система за принудително отделяне. От гледна точка на по-голямата компактност на изпълнението, малкото тегло и по-големия енергиен капацитет, най-предпочитано е използването на пиропатрони като задвижване.

Предимство на пиротехническия хидравличен механизъм спрямо пиротехническия, е че газовите канали и цилиндъра на тласкача не се чистят. Недостатъци са увеличената маса и малкия КПД.

Безопасността при използване на пирохидравличен механизъм за принудително освобождаване на товари се осигурява чрез:
- използване на обратна връзка, осигуряваща адаптивно освобождаване на товара при променящи се външни фактори, т.е. автономно осигуряване на безопасно освобождаване на товара във всички режими на полет на самолета;
- ограничаване на режимите на бойно използване, тъй като някои системи за отделяне на товари нямат възможност за регулиране на линейните и ъгловите скорости на отделяне;
- осигуряване на несъприкосновение на товара със самолета. За тази цел се разработват условия, които гарантират, че товара остава в диапазона на приемливите координати за центъра на масата на товара спрямо самолет;

- поддържане на пространствената стабилност на товара, тъй като по време на отделянето възникват аеродинамични и инерционни сили, които могат да доведат до линейни и ъглови смущения в движението на товара и следователно до удара му със самолета.

Пирохидравличният метод съчетава предимствата на бързата реакция и адаптивността към външни условия, но неговата ефективност зависи от внимателното калибриране на системата, контрола на качеството на компонентите и отчитането на специфичните условия на използване. За подобряване на надеждността се изисква интеграция с допълнителни системи за мониторинг и контрол.

Литература:

1. Нестеров В. А., Полянский В. В., Проектирование универсального замка балочного держателя, Проблемы создания перспективной авиационной техники, Сборник статей научно-исследовательских, проектно-конструкторских и технологических работ студентов, молодых ученых и инженеров, под ред. Проф. Ю. Ю. Комарова, В. А. Мхитаряна, Р. Д. Лисина М., МАИ, 2004 г. с. 21–25. https://vk.com/doc247409661_448151632?hash=tig9m2Omq57tXZQLiP1UIgrbu5TvZ49j0OXRNE3opz0
2. Правидло М. Н., Беляев А. Н., Анализ предельных возможностей систем принудительного отделения существующих установок авиационного вооружения, Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 61, УДК 623.451.8.054.93.
3. Стойков С. О., Влияние на принудителното отделяне на авиационните бомби върху техническото разсейване, ВВВУ „Г. Бенковски“, 2022, p. 111, ISBN 978-954-713-112-5.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SCIENTIFIC RESEARCH AND ITS ROLE IN THE GREEN AND DIGITAL TRANSITION

Margarita Dimitrova, Adelina Miteva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: maggy.pd@gmail.com; ad.miteva@gmail.com

Keywords: *Space material science, Artificial intelligence, Ecology, Digital transition*

Abstract: *The "twin transition" is a major global goal: making our world more digital while also making it green and sustainable. Artificial Intelligence (AI) has become a powerful tool to achieve both goals at the same time. This paper looks at how AI is changing scientific research to speed up digital updates and environmental solutions, with a special focus on materials science for the space industry. Developing materials for space requires balancing extreme performance with planet-friendly sustainability. We look at how AI helps discover new lightweight composites, improves radiation shielding, optimizes 3D printing, and reduces orbital waste. We also address a big problem: AI itself uses a massive amount of computer power, electricity, and water. Finally, we share a practical plan for "Green AI" to make sure the digital tools we use tomorrow do not harm our planet today.*

ИЗКУСТВЕНИЯТ ИНТЕЛЕКТ В НАУЧНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ: УСКОРЯВАНЕ НА ЕКОЛОГИЧНИЯ И ДИГИТАЛНИЯ ПРЕХОД

Маргарита Димитрова, Аделина Митева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: maggy.pd@gmail.com; ad.miteva@gmail.com

Ключови думи: *космическо материалознание, изкуствен интелект, екология, дигитализация*

Резюме: *„Двойният преход“ цели да направи света ни по-дигитален и същевременно по-зелен, като Изкуственият интелект (ИИ) е ключов инструмент за това. Този доклад разглежда как ИИ ускорява научните изследвания и екологичните решения в космическата индустрия. Анализира се ролята му в откриването на леки композити, подобряването на радиационната защита, оптимизирането на 3D принтирането и намаляването на орбиталния отпадък. Обърнато е внимание и на екологичния отпечатък на самия ИИ (консумация на енергия и вода).*

Introduction

The simultaneous global shift toward a green economy and a digital economy is built on the idea that sustainability and technology must develop together to reshape how societies produce and consume. This transition is referred to as the “twin transition”. Today, scientists face two major tasks: they need to use digital tools to handle massive amounts of data, and they need to find fast solutions to preserve our environment. Digital tools provide the analytical power required to solve complex ecological problems, while green priorities ensure that digital infrastructure grows responsibly without destroying our natural resources [1–3].

Nowhere is this balance more critical, or more difficult to achieve, than in the space industry. Building hardware for outer space introduces extreme operational challenges:

- Thermal Extremes: Materials must handle rapid changes between freezing cold shadows and blazing hot solar heat.
- Structural Stress: Rocket parts experience violent vibrations and heavy mechanical loads during launch.
- Vacuum and Radiation: Spacecraft face harsh cosmic rays and a vacuum environment that can cause standard materials to weaken or release toxic gases.

Historically, creating materials that could survive these conditions required decades of resource-heavy trial and error. The traditional loop relied on physically smelting metals, manual stress testing, and chemical treatments that left behind a massive carbon and toxic waste footprint on Earth.

Artificial Intelligence represents the fourth paradigm of science: data-driven discovery. By integrating advanced machine learning (ML), neural networks, and automated workflows into scientific research, AI acts as the connective tissue of the twin transition. It simultaneously satisfies the digital imperative by processing, structuring, and extracting insights from massive atomic datasets and the green imperative, by discovering lighter materials, optimizing manufacturing efficiency, and revolutionizing how we mitigate orbital waste [4–6].

This paper presents a comprehensive review and position analysis of current AI applications in space materials science, synthesizing recent case studies to propose an actionable framework for sustainable 'Green AI' adoption in the aerospace sector.

The Digital Transition: How AI Reshapes Scientific Inquiry

The digital transition in materials science extends beyond the mere digitization of analog records; it demands a fundamental shift in how hypotheses are generated, experiments are conducted, and data is synthesized at the atomic level [7–9].

Overcoming the "Curse of Dimensionality"

Scientific research frequently encounters high-dimensional spaces when mapping how different chemical elements interact. When designing a new aerospace alloy, a scientist must consider variations in temperature, pressure, elemental mixing ratios, and crystalline grain boundaries. The number of potential combinations quickly reaches into the millions, creating an informational bottleneck that traditional statistical models cannot handle.

AI algorithms, particularly deep neural networks, excel at non-linear dimensional reduction. They isolate latent variables and detect subtle atomic patterns within vast datasets that elude human analysis. This allows researchers to skip thousands of dead-end physical experiments by predicting material traits directly from digital models.

Autonomous Laboratories and Closed-Loop Systems

The integration of AI with robotics has given rise to autonomous laboratories, also known as "closed-loop" systems. In these environments, human intervention is minimized as software drives the physical research loop:

1. Hypothesis Generation: The AI system reads existing scientific literature and crystalline databases to suggest a new alloy combination.
2. Automated Synthesis: The AI instructs robotic platforms or specialized 3D printers to physically mix materials and create a test sample.
3. Real-Time Analysis: Computer vision systems and laser sensors monitor the sample's reaction to stress or heat.
4. Iterative Refinement: The algorithm processes the performance data and automatically adjusts the chemical recipe for the next round of testing.

This accelerates the cycle of digital scientific discovery by orders of magnitude, transforming materials research from a slow, manual endeavor into a highly scalable, continuous digital stream

The Green Transition: AI Applications in Space Materials Science

While AI drives digital methodologies, its ultimate value proposition within the twin transition lies in its application to pressing ecological and decarbonization challenges. In the space sector, this translates directly to reducing launch footprints, eliminating hazardous chemicals, cutting manufacturing waste, and preventing orbital pollution [7–9].

Lightweight Materials and Launch Fuel Optimization

Every single kilogram of payload launched into space requires an immense amount of rocket fuel, which releases substantial carbon dioxide and particulate soot into Earth's upper atmosphere. Therefore, the most direct way to green the space industry is to minimize the weight of the spacecraft itself.

AI disrupts traditional aerospace metallurgy through generative design and Graph Neural Networks (GNNs). By treating atoms as nodes and chemical bonds as edges, GNNs predict the physical, electrical, and thermal properties of hypothetical materials before they are physically created. This allows researchers to screen millions of candidate aluminum, titanium, and magnesium alloys in silico within days, isolating the strongest, lowest-density variants for rocket hulls, fuel tanks, and structural brackets.

Eco-Friendly and Safe Radiation Shielding

Astronauts and delicate flight computers require heavy shielding to survive the harsh radiation environment of deep space. Historically, this meant using heavy lead plates or toxic chemical composites that present severe environmental and handling hazards during manufacturing on Earth.

AI accelerates the discovery of alternative, hydrogen-rich polymer composites that block radiation naturally without ecological toxicity. By embedding fundamental subatomic physics laws directly into neural network architectures, these models simulate how cosmic rays smash through different molecular structures. This allows scientists to design clean, lightweight polymers entirely on a computer, bypassing the hazardous chemical waste streams typically generated during physical laboratory formulation.

Zero-Waste Additive Manufacturing (3D Printing)

Traditional aerospace manufacturing relies heavily on subtractive machining taking a large, solid block of titanium or aluminum and carving it away until only the finished part remains. This process is highly inefficient, often wasting up to 80% of the raw, energy-intensive material. The space industry is actively transitioning to additive manufacturing (3D printing) to build complex engine parts layer by layer, minimizing raw material consumption.

AI optimizes this green manufacturing method by monitoring the 3D printing process in real time. Specialized machine learning models process live video feeds, acoustic data, and thermal sensor metrics from the printer head [10].

Demisable Materials to Mitigate Orbital and Atmospheric Waste

When satellites reach the end of their operational lifespans, they present a dual environmental threat: they either remain in orbit as hazardous space junk, threatening future missions, or they burn up during atmospheric re-entry, leaving behind a trail of vaporized, toxic metallic pollution in the upper atmosphere. To solve this, space agencies require "demisable" materials compounds specifically engineered to break down completely, cleanly, and safely under the extreme heat of re-entry.

AI simulates the intense thermodynamic friction of atmospheric re-entry on experimental molecular blends. It predicts exactly how a satellite frame will fragment and vaporize. By using AI to design these self-consuming structures, space agencies can ensure that future satellite constellations leave zero physical footprint in orbit and zero chemical pollution in our biosphere.

Comprehensive Industrial Case Studies

To understand the real-world impact of AI on the twin transition in aerospace materials, we can look at three distinct case studies across government research, international space policy, and commercial engineering.

1. NASA Glenn Research Center and the GRX-810 Alloy

Material scientists at NASA's Glenn Research Center used artificial intelligence to develop a groundbreaking alloy called GRX-810 [9, 10].

The Problem: Components inside rocket engines must withstand temperatures over 2,000°F without melting or cracking under extreme pressure.

The AI Application: NASA deployed thermodynamic machine learning models to run thousands of virtual simulations. The AI predicted how adding microscopic particles would stabilize the metal matrix at extreme temperatures.

The Outcome: As detailed in the NASA Technology Transfer Program, the AI narrowed down the exact recipe 1,000 times faster than traditional trial-and-error laboratory work. The resulting material can survive extreme thermal stress, resists cracking, and lasts up to 1,000 times longer than standard aerospace alloys.

2. The European Space Agency (ESA) Clean Space Initiative

The European Space Agency has integrated AI into its "Clean Space" framework to systematically eliminate the long-term environmental hazards of space debris [11, 12].

The Problem: Ensuring that decommissioning satellites dissolve entirely upon atmospheric re-entry requires replacing rigid structural elements with custom aluminum-matrix composites that break down predictably under thermal stress.

The AI Application: ESA utilized deep learning models to conduct high-fidelity aerodynamic and structural testing on experimental satellite hulls. The AI tracked how mechanical stresses and high-speed plasma streams interact with complex material layups during descent.

The Outcome: The system successfully identified optimized structural designs that vaporize cleanly into the atmosphere without shedding dangerous fragments, supporting global mandates for zero-debris space missions.

3. Relativity Space and Intelligent Additive Manufacturing

In the commercial sector, private aerospace firms like Relativity Space are using generative AI to rethink rocket manufacturing from the ground up, utilizing giant, autonomous 3D printers to construct entire flight structures [13].

The Problem: Printing massive aluminum and titanium components can introduce hidden interior flaws or uneven cooling zones that ruin the structural integrity of a rocket fuel tank.

The AI Application: Neural networks are trained to analyze real-time video, acoustic, and thermal sensor data collected directly from the print head as it deposits molten metal.

The Outcome: The AI automatically corrects print parameters on the fly, eliminating raw material waste from failed prints and reducing the total time required to build a flight-ready rocket hull from years to less than 60 days.

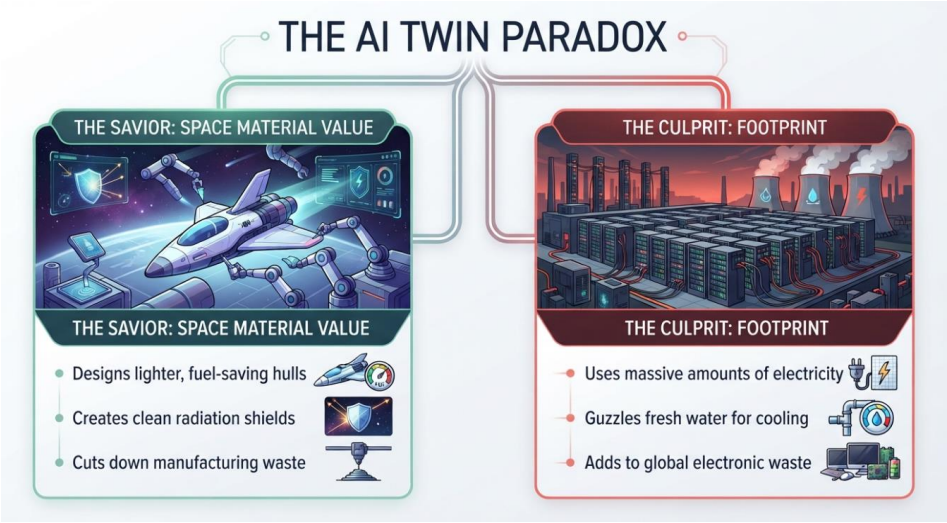
Comparative Analysis: Traditional vs. AI-Driven Materials Development

To clearly show how AI drives the digital transition while safeguarding green priorities, the following table compares traditional aerospace materials development with modern, AI-driven methodologies across key operational metrics.

Metric	Traditional Development	AI-Driven Development	Twin Transition Impact
Discovery Timeline	10 to 15 years of manual formulation and physical lab testing.	Days to weeks using high-throughput virtual screening.	Digital: Accelerates research cycles dramatically. Green: Deploys clean solutions faster.
Material Waste	High waste due to carving out metal blocks and physical trial-and-error smelting.	Minimal waste via real-time adjusted 3D printing and virtual prototyping.	Green: Preserves rare metals and reduces laboratory chemical waste.
Fuel Efficiency	Heavy or standard-weight materials increase launch vehicle fuel demands.	Generative design yields hyper-lightweight, ultra-strong parts.	Green: Directly reduces rocket fuel consumption and atmospheric carbon emissions.
Reliability	Inspected after production; hidden internal flaws can cause unexpected failures.	Monitored layer-by-layer via real-time AI computer vision.	Digital: Creates a continuous digital twin of the material. Green: Extends hardware lifespan.

The Sustainability Paradox: The Environmental Impact of AI Infrastructure

A complete analysis of AI's role in the twin transition must confront an inherent paradox: the digital tools driving environmental sustainability are themselves massive consumers of resources. The training and deployment of deep neural networks, large-scale simulations, and massive transformer architectures require substantial computational energy, introducing a potential conflict with green transition objectives if left unmanaged [15, 16].



To ensure AI remains a net-positive contributor to the twin transition, scientific research must pivot from prioritizing raw accuracy at any cost ("Red AI") toward computational efficiency and resource awareness ("Green AI").

Efficiency by Design: Model Compression Techniques

Researchers are actively developing methodologies to minimize the compute requirements of AI deployment without sacrificing predictive accuracy:

- Quantization: Reducing the numerical precision of weights and activations (e.g., from 32-bit floating-point to 8-bit integers), which dramatically lowers memory bandwidth and power consumption.
- Pruning: Systematically removing non-critical neurons or weights from a trained network, yielding compact models that run efficiently on low-power edge hardware.
- Knowledge Distillation: Transferring the capabilities of a massive, resource-heavy "teacher" model into a lightweight, streamlined "student" model tailored for sustainable deployment.

Algorithmic Innovations and Architectural Pivots

The scientific community is moving beyond dense, monolithic neural networks toward architectures that activate hardware conditionally. Spiking Neural Networks (SNNs), which mimic biological brains by processing data in sparse, event-driven bursts, offer a promising alternative to traditional continuous-activation models. Furthermore, the integration of analog neuromorphic hardware holds the potential to reduce operational energy requirements by several orders of magnitude compared to standard silicon architectures.

Future Outlook: Space Materials in the Next Decade (2026–2036)

As we look toward the next decade of space exploration, the deep integration of AI into materials science will likely move beyond individual lab experiments into a fully unified, global digital ecosystem.

- Fully Automated Off-World Manufacturing

The ultimate goal of combining AI and materials science in aerospace is to move manufacturing off Earth entirely. Future lunar bases and orbital manufacturing hubs will utilize autonomous AI loops to harvest local resources, such as lunar regolith or metallic asteroids. AI models will analyze the raw, unpredictable composition of space rocks in real time, automatically adjusting solar-powered 3D printers to construct habitats, radiation shields, and spare parts without needing supply shipments from Earth.

- Self-Healing Smart Materials

AI is accelerating the design of biomimetic, self-healing materials for long-duration deep space missions. These advanced composites contain microscopic networks filled with healing agents or shape-memory polymers. When a piece of space debris impacts a spacecraft hull, embedded AI micro-sensors instantly detect the pressure drop and trigger localized electrical currents to melt and reseal the puncture in seconds, ensuring astronaut safety while drastically extending the operational lifespan of the ship.

Conclusion

Artificial intelligence is a vital tool for the twin green and digital transition. It fundamentally improves how we do materials research for the space industry, cutting the time to find clean, lightweight composites from decades to days, improving manufacturing efficiency, and preventing orbital waste.

However, we cannot ignore the high environmental costs of computing. By using "Green AI" designs, making models smaller, and running them on clean energy, we can solve this paradox. Ultimately, we can make sure AI serves as a tool that doesn't just innovate for the stars, but actively protects our home planet.

References:

1. European Commission Joint Research Centre (JRC). (2024). A Critical Review of the Digital and Green Twin Transitions: Implications, synergies, and trade-offs. EU Research Repository.
2. Muñoz de Bustillo, Rafael, 2024/12/07, A Critical Review of the Digital and Green Twin Transitions. Implications, synergies and trade-offs
3. Maria Chiara De Lorenzi, Marta Menegoli, Maria Laura Giangrande, Igniting twin transition through artificial intelligence and stakeholder value: The case of platform-based agri-food companies, Journal of Engineering and Technology Management, Volume 78, 2025, 101920, ISSN 0923-4748, https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2025.101920
4. Gomes, C. P., et al. (2019). Computational sustainability: Computing for a better world and a sustainable future. Communications of the ACM, 62(9), 56–65.

5. Bohnsack, R., Pinkse, J., & Reischauer, G. (2026). Artificial Intelligence and the twin transition: the good, the bad, and the ugly. Industry and Innovation, 33(7), 806–825. https://doi.org/10.1080/13662716.2026.2683371
6. Hey, T., Tansley, S., & Tolle, K. (Eds.). (2009). The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery. Microsoft Research.
7. Bichlien H Nguyen, “Materials are Mission Critical to the Sustainability Transition: Accelerating Discovery of Materials for Sustainability”, Field Actions Science Reports [Online], Special Report | 2026, Online since 01 May 2026, connection on 23 October 2026. URL: http://journals.openedition.org/factsreports/8071
8. Connor Attridge, "AI and Advanced Materials: Strategic and Security Implications," CETaS Snapshot Reports (December 2025).
9. Xue Jiang, Dezhen Xue, Yang Bai, William Yi Wang, Jianjun Liu, Mingli Yang, Yanjing Su,AI4Materials: Transforming the landscape of materials science and engineering, Review of Materials Research, Volume 1, Issue 1,2025,100010, ISSN 3050-9130, https://doi.org/10.1016/j.revmat.2025.100010.
10. Smith, T.M., Kantzos, C.A., Zarkevich, N.A. et al. A 3D printable alloy designed for extreme environments. Nature 617, 513–518 (2023). https://doi.org/10.1038/s41586-023-05893-0
11. National Aeronautics and Space Administration. (2026). GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing. NASA Technical Reports Server (NTRS). Document ID: 20220013032.
12. Chanoine, A., Chiarini, S., & Innocenti, L. (2021). From cradle to grave: ESA Clean Space's approach to space sustainability. Acta Astronautica, 189, 445–453.
13. European Space Agency (ESA). (2024). Design for Demise (D4D): A new method to reduce casualty risks of space debris during re-entry. Clean Space Bureau Publications.
14. Zhang, Y., & Chen, X. (2023). Teams of robots in additive manufacturing: A review. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 36(8), 1045–1062.
15. Calvino, F., Dechezleprêtre, A., & Haerle, D. (2025). Artificial Intelligence and the twin transition: the good, the bad, and the transformation. Economics of Innovation and New Technology, 1–28.
16. Dæhlen, M. (2026). When Machines Think, the Planet Shouldn't Pay. The Guild of European Research-Intensive Universities Policy Series.

МОДИФИЦИРАНЕ НА ПОВЪРХНОСТТА НА СПЛАВ Ti6Al4V

Петя Табакова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: tangrascorp@gmail.com

Ключови думи: *Ti6Al4V, защитни покрития, твърдост, модул на еластичност, плътност*

Резюме: *Това изследване анализира влиянието на тънки защитни слоеве на основата на Ti (TiC,TiN и TiCN), отложени върху образци от сплав Ti-6Al-4V, с цел подобряване на механичните ѝ свойства.*

Чрез комплексен анализ на пробите са разгледани структурата, фазовия състав и трибологичните свойства на покритията и на основата.

Резултатите показват, че отлагането на Ti-базирани покрития с дебелина до 3.5 [μm] модифицира повърхностната структура. Повишава се твърдостта и се подобряват механичните характеристики. Модифицираните повърхности запазват ниски стойности на коефициента на триене.

SURFACE MODIFICATION OF Ti6Al4V ALLOY

Petia Tabakova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: tangrascorp@gmail.com

Keywords: *Ti6Al4V, protective coatings, hardness, modulus of elasticity, density*

Abstract: *This study analyzes the influence of thin Ti-based protective layers (TiC, TiN and TiCN) deposited on Ti-6Al-4V alloy samples in order to improve their mechanical properties.*

Through a complex analysis of the samples, the structure, phase composition and tribological properties of the coatings and the substrate were examined.

The results show that the deposition of Ti-based coatings with a thickness of up to 3.5 [μm] modifies the surface structure. The hardness increases and the mechanical characteristics improve. The modified surfaces retain low values of the coefficient of friction.

Въведение

В областта на автомобилната промишленост и космическите технологии се налага използването на леки материали с подобрени физико-механични свойства. Ti-6Al-4V е най-широко използваната титанова сплав в света (50% от общото потребление на титан). Тя е α-β сплав, съставена от 6% Al, 4% V и около 90% Ti (Таблица 1).

Сплав Ti-6Al-4V, наричана още TC4, Ti64 или ASTM клас 5, е титанова сплав с висока якост и устойчивост на корозия. Разработена е през 1954 г. като материал за брони във военната промишленост и с течение на времето областите на приложенията на Ti-6Al-4V непрекъснато се разширяват.

Добавянето на алуминий и ванадий подобрява механичните свойства на сплавта (Табл. 2).

Ti-6Al-4V има високо съотношение якост/тегло, корозоустойчивост и добра биосъвместимост. Употребата ѝ при екстремни условия разширява областите на приложения там, където се търсят надеждни качествени материали. Недостатък са ниските трибологични свойства.

В материала са разгледани варианти за подобряване на повърхностните характеристики на сплав Ti6Al4V чрез отлагане на защитни титанови покрития (TiC, TiN, TiCN, TiAlCN). До 400°C сплавта има стабилна микроструктура и температурна устойчивост.

Стойността на коефициентите на триене (COF) за покритията е около 0.139, което може да се разглежда като добър подход за изготвяне на стабилни износоустойчиви покрития и при стайна температура.

Износоустойчивостта и корозионната устойчивост на покритията се подобряват като се увеличава въглеродното съдържание. Максималната твърдост от 44.36 GPa и H/E от 0.140 се получава при съдържание на въглерод от 12.4 ат.%. Покритието се характеризира с, плътна структура, висока твърдост и стабилен пасивационен слой с минимален COF от 0,071.

В Табл. 1 и Табл. 2 са показани съответно химичният състав и физичните свойства на сплав Ti6Al4V.

Таблица 1. Химичен състав на сплав Ti-6Al-4V в [wt.%]

Al	Fe	O	V	C	N	H	други	Ti
5.6–6	до 0.25	до 0.2	3.6–6.78	0.08	0.05	0.015	до 0.4	до 100%

Таблица 2. Физични свойства на сплав Ti-6Al-4V

Плътност [g/cm³]	Якост на опън [MPa]	Твърдост HV	Топене [°C]
4.43–4.51	1000–1200	320	~ 1600–1660

Трибо-механични свойства на защитни Ti-покрития

Добрите механични и трибологични на иновативните защитни свойства на титановите мултислойни покрития, които могат да се прилагат в промишлени условия, ги превръщат в много добър избор за повърхностна обработка.

Процесите, които влошават структурата на материалите, са основно в резултат на атмосферното влияние. В системи, при които има въртящи се елементи, покритията могат да действат като трибологична бариера, която устоява на процеси, износващи материала чрез корозия, абразия, адхезия и умора. На повърхността, където износването и корозията действат синергично, покритията трябва да са твърди и инертни, с много ниски КОФ.

В промишлеността апаратурата и детайлите работят в широк температурен диапазон от –200ºC до +400ºC и повече. При високи температури се променят якостните свойства на материалите.

Слоевете титанов карбонитрид (TiCN) съчетават висока твърдост и висока термична стабилност.

Титановият карбид (TiC), има много голям диапазон на стабилност и значително количество въглеродни ваканции. Характеризира се с ниска топлопроводимост, висока точка на топене, висока твърдост и изразена нестехиометрия,

Слоевете титанов нитрид (TiN) притежават висока твърдост.

При TiAlCN- покритие е измерена висока адхезия (156 N) и нисък коефициент на триене (0.231).

TiAlCN покритието може да образува нанокристални структури, обвити от въглеродна аморфна фаза, чрез регулиране на съотношението C/N.

TiAlCN покритието намалява адхезионното износването по време на високоскоростно рязане на инструменти от титанова сплав

КОФ на не показва големи разлики при отлагане с различни технологии.

Експериментални данни

Анализите на сплав Ti-6Al-4V с покритията показват добра адхезия към основата и повишаване на износоустойчивостта, респективно нисък коефициент на триене.

Отложените покрития от TiN и TiCN (по PVD-CAD метод) разширяват температурния интервал съответно до 600°C и 900°C. Фазовият състав и микроструктурата на повърхността се променят в зависимост от работните условия на инструментите и детайлите. Измерени са твърдост, еластичност и коефициент на триене. Изследвано е влиянието на покритията и ролята им като дифузни бариери при работни условия. Предложените покрития подобряват механичните и трибологичните свойства на сплав Ti6Al4V. Могат да се отлагат и върху стомани за подобряване на свойствата на машинни детайли, режещи инструменти и др., работещи в температурен диапазон от 350°C до 900°C и нагоре. Прилагат се още в промишлеността като довършителна обработка на различни детайли.

Таблица 3. КОФ за материали

Материал	КОФ / вакуум (сух контакт)
Алуминиеви сплави	0.4–1.05
Стомани	0.15–0.5
Бронз (сплав на Cu и Sn)	0.22
Cu- материали	0.15–0.53
Стъкла	0.09–0.12
Диамант	0.05–0.1
Графитни материали	0.15 / (0.5–0.8)
TiC	0.1–0.8
TiN	0.2–0.9
Mg	0.08–0.6
Ag	0.55–1.4
Fe	0.15–0.2
Ni	0.12–0.7

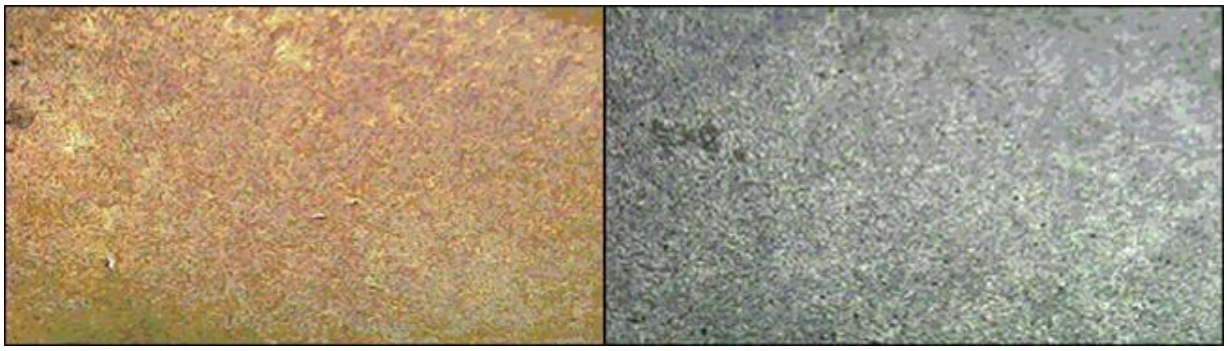
Коефициентът на триене (Табл. 3) при добавка на Ag, Cu, Fe в материалите намалява. Малки добавки от Ni, Mo, P и др. в материала водят до подобряване на триенето и намаляване на КОФ. Измерените стойности на COF TiC и TiN са при натоварване от 0.8 N.

Отлагане на покрития

С цел подобряване на механичните характеристики на работната повърхност на сплав Ti-6Al-4V може да се осъществи чрез отлагане на тънки слоеве и покрития.

За полагане на покрития с различна дебелина, свойства и състав се използват различни процеси и техники. Методите за отлагане на тънки филми на TiCN и TiN (Фиг. 1а и Фиг. 1б) включват техники за физическо отлагане на пари, като магнетронно разпрашване и катодно дъгово отлагане, както и техники за химическо отлагане от пари, като например плазмено усилено химическо отлагане. Други методи включват реактивно плазмено пръскане на композитни прахове и в някои случаи, in-situ модификация на съществуващи филми от TiN с въглерод.

Химичният (CVD) и физичният (PVD) метод за отлагане на твърди покрития са водещи методи, имащи висока скорост на отлагане, хомогенност и добра равномерност на покритието. Използването на FAD, PVD-техниката (Filtered Arc Deposition) позволява отлагането на тънки, твърди филми с дебелина до 3 μm. TiC, TiN и TiCN-покритията увеличават твърдостта на сплавта, като я правят подходяща при производството на режещи и пробивни инструменти.



Фиг. 1а. TiN

Фиг. 1б. TiCN

Фиг. 1а и Фиг. 1б изображения на покрития от TiN и TiCN, направени с електронен микроскоп при увеличение 500 пъти.

PVD процесите включват разпрашване и изпарение, протичащи при температури от 200 до 500°C и са подходящи за термочувствителни субстрати. PVD покритията са предимно тънки слоеве с дебелина под 5 микрона. С тях може да се постигне добра адхезия на слоевете към подложката и покритията могат да устоят на леки химични атаки, действайки като бариери срещу корозивни агенти. Тъй като са тънки, те са склонни да имат дефекти и пори. Тънки, еднородни PVD слоеве се използват като износоустойчиви покрития. Магнетронното разпрашване с висока мощност (HIPIMS), подобрява плътността и адхезията на PVD покритията и по този начин се повишават техните защитни способности.

С CVD методът се отлагат покрития като продукт на химична реакция на газообразни прекурсори върху нагрят субстрат. Това е отлагане при относително висока температура над 800°C. CVD покритията в сравнение с PVD, обикновено са по-дебели (25–75 um), по-плътни и безпорести. Тази плътна и здрава структура осигурява по-добра устойчивост в агресивни среди. CVD се използва при покриване на сложни геометрични форми и вътрешни повърхности, постигайки равномерна дебелина

Тези процеси позволяват отлагането на метални или неметални филми с висок контрол върху дебелината, състава, микроструктурата и адхезията. Важни са за подобряване на бариерните свойства и методите за активна защита.

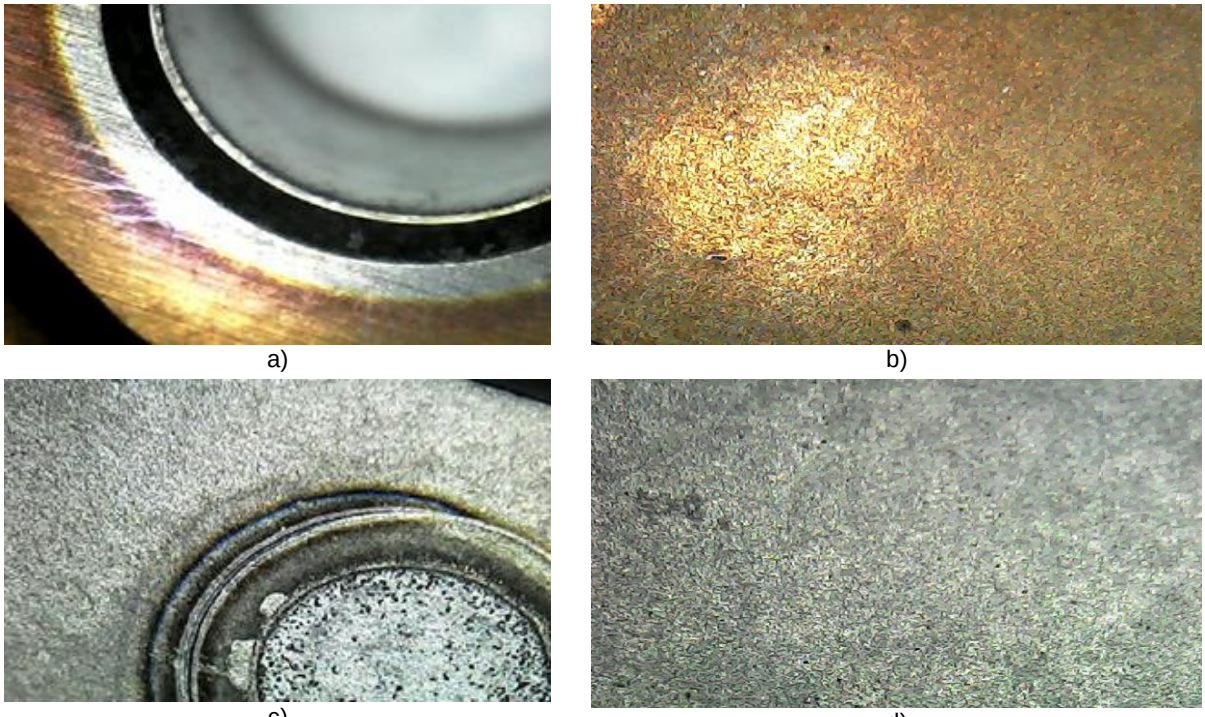
КОФ на TiAlN няма големи разлики при отлагане с различни технологии. При TiAlCN покритие е измерена висока адхезия (156 N) и нисък коефициент на триене (0.231).

TiAlCN покритието може да образува нанокристални структури, обвити от въглеродна аморфна фаза, чрез регулиране на съотношението C/N.

T_iAlCN покритието намалява адхезионното износването по време на високоскоростно рязане на инструменти от титанова сплав.

За отлагането на тънки Ti(C,N) слоеве се използва титаново-карбидна мишена в газова смес Ar/N_2. Параметрите, влияещи върху процеса, са: мощност на разпрашване, налягане, време на отлагане и съотношението на дебита N_2/Ar.

TiN (Фиг. 2a, b) и TiCN (Фиг. 2c, d) покритията имат плътна кубична структура с малък размер на частиците, плътно разположени, сравнително гладки (като следват неравностите на основата), което затруднява дифундирането на атоми и молекули през тях.



a) b) c) d)

Фиг. 2. TiN – 2a и 2b, TiCN – 2c и 2d

TiN- покритието е стабилен до 600 °C с HV2000, TiCN - HV3000 и устойчивост до 900°C (Табл. 4). В Таблица 4 могат да се видят и Модулите на Юнг.

Таблица 4. Измерена твърдост на TiN, TiN и TiCN слоеве.

Покритие	**TiC**	**TiN**	**TiCN**
Твърдост HV	2400	2000	3000
Модул на Юнг [GPa]	120	180	151

TiCN има по-ниска химична активност с Fe и други метали заради наличието на C. Това го предпазва от дифузия на C, O и N (например при инструменти от WC- Co и стомани) в контакт, там където се достигат високи работни температури. Покритието блокира дифузията на елементи от субстрата (Co и W за твърди материали) към повърхността. По този начин се удължава живота на инструмента.

Таблица 5. Сравнение на T_iN и T_iCN слоеве

Характеристики	TiN	TiCN
Кристална структура	Кубична (тип N_aCl)	Кубична (тип NaCl), но съдържа C в решетката
Твърдост HV	~ 2000	~ 3000
Плътност	7.3 g/cm³	6.68 g/cm³
Температура на устойчивост	до ~ (500–600) °C	до ~ (800–900) °C
Дифузионна бариера срещу Fe, C, O	Добра при ниски и средни температури	Добра заради C в структурата и при високи температури
Роля като дифузионна бариера (Фиг. 2)	Забавя износването чрез дифузия (Фиг. 2a)	Силно ограничава дифузията, особено при високи температури (Фиг. 2b)
КОФ	Малък	Много малък

При сплав Ti6Al4V много подходящо е използването на градиентно покритие в следната последователност: отлага се слой от **TiC,** след това следва слой **TiN** и най-горният слой е **TiCN.** В градиентните покрития могат да се наблюдават структурни промени и/или фазоотделяне, което води до подобрение на омокряемостта и адхезията.

Заключение

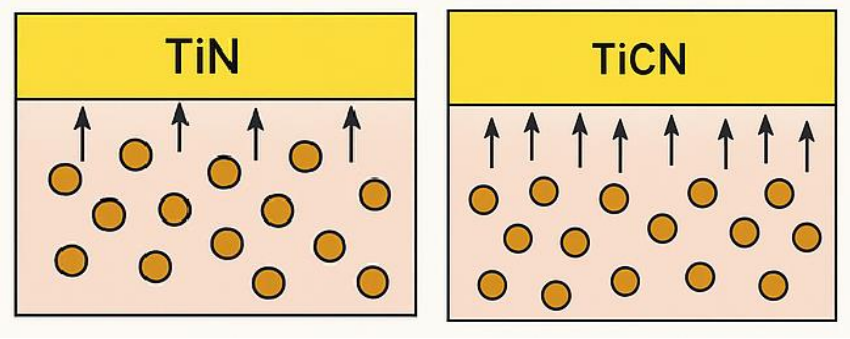
Разрушителните процеси като окисление, дифузия и прегряване при работни температури влияят негативно върху режещите инструменти. Плътната кристална решетка, химичната стабилност и ниската порьозност на покритията намаляват това вредно влияние.

TiN покритието е с висока твърдост и ниско триене, но при високи температури е възможна дифузия на атоми. TiCN покритието подобрява твърдостта, КОФ 0.2 . Наличието на C в структурата възпрепятства атомите на елементите от основата и увеличава устойчивостта срещу дифузия при високи температури. Ефектът на многослойна структура, с различни коефициенти на дифузия в слоевете възпрепятстват атомите.

При инструменти с трудна обработка, високи температури и агресивни среди. TiCN е подходящо покритие.

TiN осигурява дифузионна бариера при средни температури и базова защита (Фиг. 3a), а TiCN е ефективна бариера при високи температури (Фиг. 3b).

Като пример може да се даде и това, че TiN и TiCN могат да намалят износването на WC с Co, особено ако са плътни и равномерно отложени. Въпреки това, при високи температури и изразени граници на зърната, често се наблюдава дифузия на Co/W през TiN/TiCN.



a) b)

Фиг. 3. Схематично представяне на ролята като дифузионна бариера за слоеве: a) TiN и TiCN

В заключение можем да отбележим, че изборът на покритие от TiC, TiN и TiCN зависи от специфичните изисквания на приложението. TiC е идеален за приложения с висока износоустойчивост. TiN се отличава с устойчивост на корозия и е универсален избор за промишлени приложения, докато TiCN предлага балансирани характеристики с добра износоустойчивост, което го прави подходящ за специфични условия. Всяко покритие има своите силни и слаби страни и изборът трябва да е съобразен с условията на обработка и желаната производителност на инструментите и детайлите.

Литература:

1. Табакова, П., Петрова, А. Свойства и приложения на сплав Ti-6Al-4V. SES 2024, ИКИТ-БАН, 2024, ISSN:2603-3313, 311–314
2. Табакова, П., Петрова, А., Григоров, К. ТРИБО-МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА ЗАЩИТНИ Ti-ПОКРИТИЯ. SES 2025, ИКИТ-БАН, 2025, ISSN:2603-3313, 349–353.
3. Табакова П., Йорданов Ц., Петрова А. АНАЛИЗ НА МИКРОСТРУКТУРАТА ПРИ ЗАВАРЯВАНЕ НА ВИСОКОЯКОСТНИ СПЛАВИ А7075 Т651 И Ti-6Al-4V. Сборник доклади от научна конференция „Знание, наука, иновации, технологии”, "Технически науки", „Институт за знание, наука и иновации”, 2026, ISSN:2815-3480, 1451–1464

Session 3

Remote Sensing and Geoinformation Systems

Chairmen: Prof. Lachezar Filchev

Secretary: Mihaela Tsvetkova

REGIME-CONDITIONED COVERAGE OF MONTE CARLO INTERVALS FOR TROPOMI-DERIVED SURFACE NO_2 DURING WINTER STAGNATION IN THE SOFIA BASIN

Dimitar Makariev, Plamen Trenchev

Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: dmakariev@space.bas.bg; ptrenchev@space.bas.bg

Keywords: *TROPOMI; nitrogen dioxide; Monte Carlo simulation; interval coverage; planetary boundary layer; winter stagnation; ERA5; Sobol sensitivity; Sofia Basin; air quality*

Abstract: *Aggregate interval coverage can conceal systematic failure under the meteorological conditions associated with the highest surface pollution. This study develops the winter NO_2 case proposed in the authors' earlier reviews into a reproducible uncertainty-propagation and validation protocol for the Sofia Basin. TROPOMI tropospheric NO_2 columns are converted to surface mass concentrations with an explicit mixed-layer approximation. Monte Carlo sampling propagates uncertainty in the retrieved column, ERA5 boundary-layer height, 10 m wind, and pixel-to-station representativeness. A prespecified ERA5 rule separates shallow, weak-wind stagnation from ventilated station-days; the rule is a stagnation classifier, not a direct measurement of a temperature inversion. The central 90% interval is evaluated using regime-specific coverage, median width, and the proper interval score. Day-block resampling preserves dependence among stations exposed to the same daily retrieval and meteorology. In a synthetic January 2021 verification dataset, Sofia coverage is 63.9% under stagnation and 87.7% under ventilation, a difference of −23.8 percentage points (95% block-bootstrap interval −39.2 to −7.7). Boundary-layer height contributes 61.4% of first-order output variance under stagnation and 32.2% under ventilation. These results verify the analysis workflow but do not provide evidence about January 2021 air quality. Scientific inference requires replacement of the synthetic fields with collocated TROPOMI, ERA5, and EEA observations.*

РЕЖИМНО ОБУСЛОВЕНО ПОКРИТИЕ НА МОНТЕ КАРЛО ИНТЕРВАЛИ ЗА ПРИЗЕМЕН NO_2, ИЗВЛЕЧЕН ОТ TROPOMI, ПРИ ЗИМЕН ЗАСТОЙ В СОФИЙСКАТА КОТЛОВИНА

Димитър Макариев, Пламен Тренчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: dmakariev@space.bas.bg; ptrenchev@space.bas.bg

Ключови думи: *TROPOMI; азотен диоксид; Монте Карло симулация; покритие на интервали; планетарен граничен слой; зимен застой; ERA5; Собол анализ на чувствителността; Софийска котловина; качество на въздуха*

Резюме: *Обобщеното покритие на интервалите може да скрие систематични грешки при метеорологичните условия, свързани с най-високи приземни концентрации. Изследването развива зимния пример за NO_2 от предишните публикации на авторите във възпроизводим протокол за разпространяване на неопределеността и валидиране в Софийската котловина. Тропосферните колони NO_2 от TROPOMI се преобразуват в приземни масови концентрации чрез явно допускане за хомогенно смесване в граничния слой. Монте Карло симулацията разпространява неопределеността в сателитната колона, височината на граничния слой от ERA5, вятъра на 10 m и представителността между пиксела и станцията. Предварително зададено правило на ERA5 разделя дните на застойни и проветриви; правилото класифицира застой, а не измерва пряко температурна инверсия. Централният 90% интервал се оценява чрез покритие, медианна ширина и правилен интервален показател, като блоковото преизбиране по дни запазва зависимостта между станции с обща метеорология. В синтетичния набор за проверка за януари 2021 г. покритието в София е 63.9% при застой и 87.7% при проветряване, разлика −23.8 процентни пункта (95% блоков интервал −39.2 до −7.7). Височината на граничния слой обяснява съответно 61.4% и 32.2% от дисперсията от първи ред. Тези резултати проверяват аналитичния процес, но не са доказателство за реалното качество на въздуха през януари 2021 г. Научните изводи изискват замяна на синтетичните полета с колокирани наблюдения от TROPOMI, ERA5 и EAOC.*

1. Introduction

Tropospheric nitrogen dioxide is an indicator of combustion-related emissions and a precursor of ozone and nitrate aerosol. Sentinel-5 Precursor TROPOMI provides near-daily tropospheric NO_2vertical columns at kilometre-scale nadir resolution [1, 2]. A satellite column does not directly measure the concentration at a monitoring inlet. Column-to-surface conversion depends on the vertical NO_2profile, the retrieval averaging kernel, clouds, surface reflectance, boundary-layer depth, chemistry, and spatial representativeness [2–7]. These dependencies become critical during winter stagnation, when emissions can remain concentrated in a shallow layer and a pixel-average column may not describe the surface enhancement at a particular station.

Sofia offers a demanding case. The city lies in an intermontane basin where weak winds and winter temperature inversions impede ventilation. Lidar observations have documented shallow, multilayer nocturnal structure over Sofia, while later studies report frequent winter inversions and pollution episodes associated with weak dispersion [8–10]. A method that appears calibrated across all winter days can therefore fail on the subset of shallow-boundary-layer days most relevant to exposure and air-quality management.

Our earlier SES contribution reviewed Monte Carlo simulation and hybrid atmospheric modelling as parts of a wider intelligent-modelling toolkit [11]. A subsequent review connected uncertainty propagation, Earth-observation data, and an operational hybrid workflow [12]. The present work turns that conceptual programme into a falsifiable pilot experiment. Its central question is not whether a Monte Carlo interval is wide enough on average. It is whether a nominal 90% interval covers independent surface observations at approximately the same rate in stagnant and ventilated regimes.

The analysis is organised around two prespecified hypotheses. **H1:** coverage of the nominal 90% interval is lower on stagnant than on ventilated Sofia station-days. **H2:** the first-order Sobol index of boundary-layer height is larger under stagnation. The study makes the assumptions in the column-to-surface conversion explicit, fixes the meteorological regime rule before evaluation, and reports calibration and sharpness by regime rather than only in aggregate. The January pilot is a physically constrained synthetic verification dataset. It tests the code path, estimands, and graphics but cannot support conclusions about measured January 2021 pollution. The final inference requires collocated TROPOMI, ERA5, and EEA records.

2. Study design and data

2.1. Spatial design

The target domain comprises EEA monitoring locations within Sofia and a control location in Plovdiv. Sofia represents the basin setting in which shallow winter boundary layers and weak winds can sustain near-surface accumulation. Plovdiv is not a clean-background reference; it is an urban control outside the Sofia Basin, used to test whether an apparent coverage deficit follows the Sofia stagnation regime rather than affecting every urban station indiscriminately.

The pilot uses four stable station aliases: three Sofia locations representing two urban-background contexts and one traffic-influenced context, plus one Plovdiv control. The aliases deliberately separate the analysis code from final station identifiers. In the observational run, each alias will map to an EEA station code, coordinates, station type, inlet height, and the TROPOMI pixel-selection record. Station metadata and validated hourly NO_2 data will be obtained from the EEA air-quality download service [13].

2.2. One-month pilot period

January 2021 is used as a winter demonstrator month. Bulgarian studies document frequent winter inversions, shallow boundary-layer structure, and pollution episodes in Sofia, but the present synthetic dataset does not reproduce a specific observed episode [8–10]. Each day contributes one satellite-overpass comparison per station when quality screening succeeds. The provisional pilot contains 31 days and 124 station-days. The primary Sofia evaluation contains 93 station-days: 36 observations on 12 stagnant days and 57 observations on 19 ventilated days. The Plovdiv control contributes 31 station-days. This separation is retained throughout the coverage analysis so that the control city does not influence the Sofia estimate.

The numerical fields in the pilot data file are generated from deterministic pseudo-random draws with seed 20261017. They preserve realistic orderings: stagnant days have lower boundary-layer heights, lower winds, higher urban columns, and larger relative uncertainty. They do not reproduce an EEA or TROPOMI measurement. This distinction is retained in every data row through a data_status field.

2.3. TROPOMI and ERA5 inputs

The observational implementation will use the offline or reprocessed Sentinel-5P Level-2 NO_2 product and retain pixels with qa_value ≥ 0.75, following product guidance and validation practice [2, 3, 5, 14, 15]. Pixel values will be area-weighted when a station falls within more than one valid footprint. The comparison time will be the TROPOMI overpass. Station observations will be averaged within a symmetric temporal window, with at least 75% hourly completeness; both the window width and completeness will be recorded in the data manifest. The product-supplied column precision will enter the Monte Carlo distribution rather than being discarded after screening.

ERA5 provides hourly boundary-layer height and 10 m wind components [16]. Wind speed is calculated from the zonal and meridional components:

$$u_{10} = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Meteorological fields are interpolated to the satellite overpass and station coordinate. ERA5 is used consistently for regime classification and for centring the input distributions; this avoids mixing classification from one meteorological product with uncertainty propagation from another.

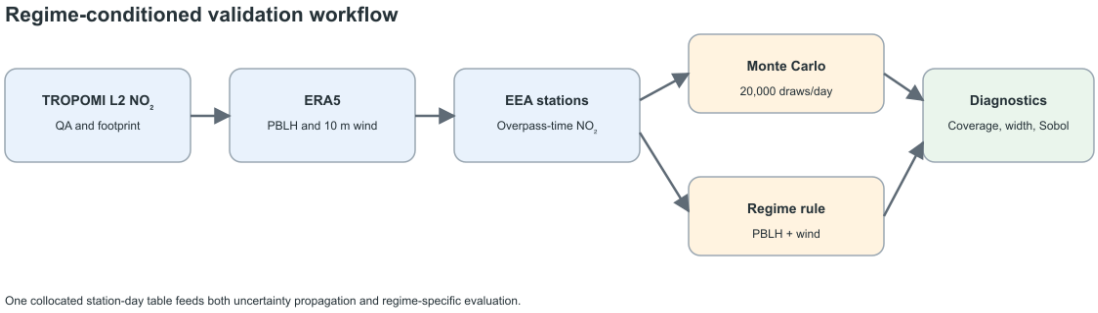


Fig. 1. End-to-end pilot workflow. The same collocated station-day record supports interval construction, regime-conditioned validation, and sensitivity analysis.

2.4. Regime definition

The primary regime rule is applied to ERA5 values interpolated to the TROPOMI overpass and is fixed before coverage evaluation:

$$stagnant\ if\ PBLH < 350\ m \wedge u_{10} < 2.0\ m\ s^{-1};\ ventilated\ otherwise$$

The threshold pair is intentionally simple and operational. It identifies the joint state of shallow mixing and weak horizontal ventilation; it does not diagnose the sign or strength of a temperature inversion from a vertical temperature profile. The paper therefore uses *stagnant* and *ventilated* for the evaluated regimes and reserves *inversion* for the physical motivation. A sensitivity appendix in the final observational analysis will repeat the calculation for boundary-layer thresholds of 300 and 400 m and wind thresholds of 1.5 and 2.5 m s^{-1}. If the inference changes materially, threshold sensitivity will be reported rather than selecting the most favourable split.

3. Monte Carlo model

3.1. Column-to-surface conversion

For day *d*, station *s*, and Monte Carlo draw *k*, the provisional surface concentration is

$$C_{d,s}^{(k)} = 10^6\, M_{NO_2}\, \frac{\Omega_{d,s}^{(k)}}{H_{d,s}^{(k)}}\, R_{d,s}^{(k)}\, V_{d,s}^{(k)}$$

where Ω is the screened TROPOMI tropospheric vertical column in mol m^{-2}, $M(NO_2)$ = 46.0055 g mol^{-1}, H is the ERA5 boundary-layer height in metres, and the factor 10^6 converts g m^{-3} to µg m^{-3}. R is a positive station-day multiplicative term representing footprint-to-inlet mismatch and unresolved local enhancement. It is not an emission inventory estimate. The dimensionless ventilation perturbation is

$$V_{d,s}^{(k)} = \left[\frac{\bar{u}_{d,s} + u_0}{u_{d,s}^{(k)} + u_0}\right]^{\beta}$$

with u_0 = 0.5 m s^{-1} and β = 0.4. The offset limits numerical instability at very low wind speed. The exponent is a pilot assumption and will be examined in sensitivity analysis rather than fitted on the evaluation month.

The term $10^6 M\Omega/H$ is a mass-conserving mixed-layer approximation. It assumes that the column relevant to the station is confined below H and uniformly distributed within that layer. This assumption is stronger than merely assuming that most urban NO_2 lies in the boundary layer because TROPOMI also senses free-tropospheric NO_2 and has vertically varying sensitivity [2, 15, 17]. Published column-to-surface methods commonly use modelled concentration-to-column ratios or learned relationships with meteorology and land-use covariates [4–7]. The expression used here is therefore a transparent stress-test baseline, not a replacement for a chemical transport model.

3.2. Input distributions

Each station-day uses 20,000 draws. In the baseline design, Ω, H, u, and R are sampled independently so that first-order Sobol indices have their standard interpretation. Dependence is physically plausible, especially between boundary-layer height, wind, and the observed column, so the final analysis will include a separate correlation sensitivity experiment; Sobol indices will not be reported for that correlated experiment. Positive inputs are sampled from lognormal distributions. For an input with arithmetic mean *x* and coefficient of variation CV, the log-scale parameters are

$$\sigma_{ln}^2 = ln(1 + CV^2), \quad \mu_{ln} = ln(x) - \frac{1}{2}\sigma_{ln}^2$$

Wind is sampled from a lower-truncated normal distribution. The provisional settings are shown in Table 1. For the observed run, the TROPOMI column CV will combine the product precision with a documented structural component for air-mass-factor and profile uncertainty [2, 3, 15]. The boundary-layer scenarios are deliberately broader under stagnation because shallow and stable layers are difficult to define consistently across observations and reanalysis [18, 19]. The R distribution represents footprint-to-inlet mismatch and unresolved local enhancement. The fixed pilot values are scenario assumptions used to test the workflow; they are not claimed as estimates for Sofia.

Table 1. Provisional Monte Carlo distributions. Final parameters will be estimated or justified against the collocated observational data.

Input	Distribution	Stagnant regime	Ventilated regime
TROPOMI NO_2 column Ω	Lognormal, centred on screened Level-2 value	CV 22%	CV 22%
Boundary-layer height H	Lognormal, centred on ERA5	CV 48%	CV 24%
10 m wind u	Truncated normal, centred on ERA5	SD 0.38 m s^{-1}	SD 0.55 m s^{-1}
Representativeness factor R	Lognormal, mean 1.0	CV 24%	CV 24%

The 5th and 95th percentiles form the central 90% uncertainty interval, and the median is the point summary. This is not a formal predictive interval unless R and the other inputs account for all material model discrepancy and observation error. Coverage against independent stations tests that assumption. Monte Carlo error is checked by repeating representative days with twice the draw count; the final workflow requires changes below 0.5 µg m^{-3} in both endpoints [20].

3.3. Coverage and sharpness

For regime r with station-day set G_r, empirical coverage is

$$\hat{p}_r = \frac{1}{n_r}\sum_{(d,s)\in G_r} \mathbb{1}\{L_{d,s} \le y_{d,s} \le U_{d,s}\}$$

where y is the station observation and [L,U] is the central 90% Monte Carlo interval. Because stations on the same day share meteorology and satellite retrieval error, uncertainty in coverage is estimated by resampling whole days within each regime. The reported 95% intervals use 20,000 day-block bootstrap samples. Coverage must be interpreted together with sharpness, summarized by the median width W = U − L. For α = 0.10, the interval score is

$$IS_\alpha(L, U; y) = (U - L) + \frac{2}{\alpha}(L - y)\,\mathbb{1}_{\{y<L\}} + \frac{2}{\alpha}(y - U)\,\mathbb{1}_{\{y>U\}}$$

Lower mean interval score is better because the score rewards narrow intervals but penalizes misses in proportion to their distance beyond the nearest endpoint [21, 22]. Coverage, median width, and mean interval score will be reported together; no single metric is treated as sufficient.

The primary estimand for H1 is the coverage contrast $\Delta\hat{p} = \hat{p}_s - \hat{p}_v$, where the subscripts denote the stagnant and ventilated regimes. Its day-block bootstrap interval is obtained by resampling days independently within each regime. Regime-specific coverage, width, and interval score

are co-primary diagnostics. Aggregate coverage is secondary. Plovdiv is reported as a control diagnostic and is not pooled with Sofia to claim transferability.

3.4. First-order Sobol indices

Variance-based sensitivity analysis decomposes model-output uncertainty into contributions from individual inputs and their interactions [23]. The first-order Sobol index is

$$S_i = \frac{Var_{X_i}(E[Y \mid X_i])}{Var(Y)}$$

where Y is the simulated surface concentration and X_i is one uncertain input. The pilot uses two independent sample matrices and 50,000 base draws per regime. Indices are calculated at representative regime conditions rather than averaged across days. The comparison of interest is the change in S_h, the first-order index of boundary-layer height, between stagnant and ventilated regimes.

4. Illustrative pilot results

4.1. Daily intervals

Figure 2 shows the complete January sequence for one Sofia urban-background alias. The shaded band is the 90% Monte Carlo interval; orange background strips mark stagnant days. Intervals widen sharply during stagnant episodes because the same absolute uncertainty in a shallow boundary layer becomes a much larger relative uncertainty in C. Several provisional station values approach or exceed the upper endpoint during these episodes, whereas most ventilated-day values remain inside the band.

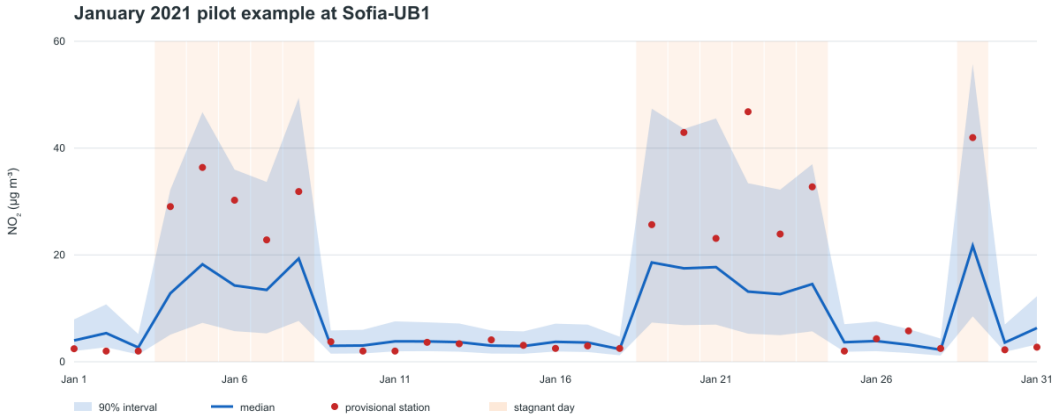


Fig. 2. Illustrative daily 90% intervals and provisional station values for Sofia-UB1 in January 2021. All numerical values are synthetic pilot data.

4.2. Regime-conditioned coverage

Across the 93 Sofia station-days, coverage is 78.5% (day-block bootstrap 95% interval 69.9–87.1%), below the nominal 90% level in the synthetic verification dataset. Coverage is 63.9% (52.8–75.0%) for the 36 stagnant station-days and 87.7% (77.2–96.5%) for the 57 ventilated station-days. The prespecified contrast is Δp = −23.8 percentage points (95% block-bootstrap interval −39.2 to −7.7). The Plovdiv control reaches 96.8% (90.3–100.0%) across 31 station-days.

The stagnant Sofia intervals are also much wider. Their median width is 38.1 µg m^{-3}, compared with 5.1 µg m^{-3} for ventilated days. The mean 90% interval score is 100.2 µg m^{-3} under stagnation and 7.2 µg m^{-3} under ventilation; the large stagnant value reflects both wide intervals and large exceedances. Wider intervals therefore do not restore calibration in the synthetic demonstrator. Table 2 reports the coverage and width results using mutually consistent analysis groups.

Table 2. Illustrative coverage and sharpness. Confidence limits resample complete days; all values are synthetic.

Evaluation group	Station-days	Days	Coverage	95% block-bootstrap interval	Median width (µg m^{-3})
Sofia, all regimes	93	31	78.5%	69.9–87.1%	7.0
Sofia, stagnant	36	12	63.9%	52.8–75.0%	38.1
Sofia, ventilated	57	19	87.7%	77.2–96.5%	5.1
Plovdiv control	31	31	96.8%	90.3–100.0%	4.8

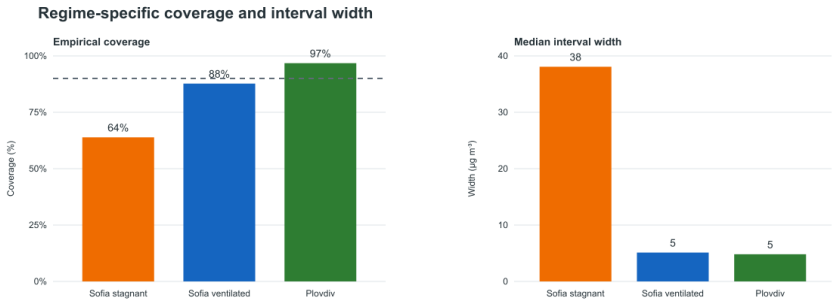


Fig. 3. Illustrative empirical coverage and interval width by regime. The dashed line marks nominal 90% coverage.

4.3. Sensitivity structure

Boundary-layer height is the dominant first-order uncertainty source under stagnation, with S_h = 0.614. Its share decreases to 0.322 in the ventilated regime. The TROPOMI column share rises from 0.134 to 0.277, and the representativeness-factor share rises from 0.154 to 0.325. The wind perturbation contributes about 0.03 in both regimes. The remaining variance is associated with interactions and Monte Carlo estimation error.

This result is consistent with the model structure: concentration varies inversely with H, and the stagnant distribution assigns H the largest relative uncertainty. It should not be interpreted as independent evidence that ERA5 boundary-layer height is erroneous. Sobol indices describe uncertainty under the chosen input distributions; changing those distributions changes the indices.

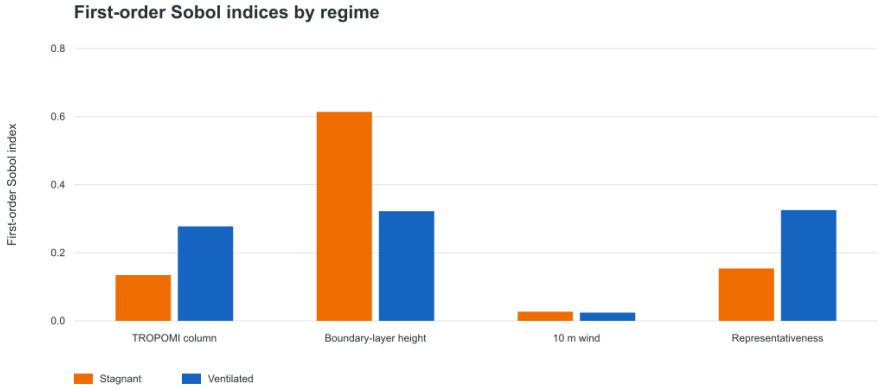


Fig. 4. First-order Sobol indices for representative stagnant and ventilated conditions in the illustrative pilot.

4.4. Surface enhancement diagnostic

The relationship between the Monte Carlo median and the provisional station value differs by regime (Fig. 5). Ventilated points cluster around the 1:1 line, while stagnant Sofia points shift above it. This pattern is the intended stress test: a homogeneous mixed-layer conversion can understate near-surface enhancement when stable stratification confines emissions to a layer shallower or more internally stratified than the ERA5 boundary-layer estimate.

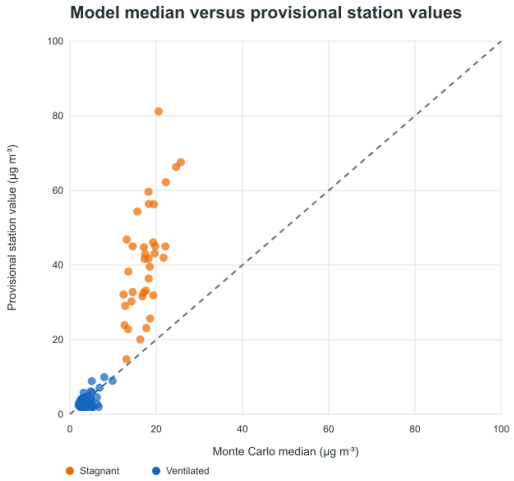


Fig. 5. Monte Carlo median versus provisional Sofia station values. The comparison diagnoses regime-dependent near-surface enhancement rather than model fit.

5. Discussion

5.1. Why aggregate coverage is insufficient

An interval can attain near-nominal overall coverage by combining overcoverage in easy conditions with undercoverage in the conditions that matter most. For air-quality applications, the cost is asymmetric: missing high concentrations during winter stagnation is more consequential than producing a conservative interval on a well-ventilated day. Regime-conditioned coverage therefore functions as a scientific diagnostic, not merely a statistical refinement.

The synthetic pilot shows how this diagnostic changes interpretation. Sofia-wide coverage of 78.5% hides a 23.8 percentage-point contrast between regimes, and the interval score confirms that stagnant failures are not explained by width alone. This pattern was deliberately embedded in the verification data to test whether the analysis recovers a known regime-dependent failure. It therefore validates the implementation, not the atmospheric hypothesis. Only the observational replacement can determine whether the same failure exists in Sofia.

5.2. Physical interpretation

The homogeneous-mixing assumption is most defensible near the early-afternoon TROPOMI overpass when convective mixing is established. It is least defensible during persistent winter inversions, complex basin circulations, and situations with strong vertical gradients. TROPOMI urban enhancements reflect wind-dependent accumulation and transport [24]. The retrieval also depends on an a priori vertical profile through the air-mass factor, while independent work demonstrates that tropospheric NO_2 has substantial vertical structure [2, 3, 15, 17]. A shallow or internally stratified layer can therefore affect both the retrieved column and its conversion to a surface value.

The high stagnant-regime S_h is meaningful within the pilot because H enters the conversion inversely and receives a larger relative uncertainty. It provides a practical prioritisation: improved boundary-layer information, such as radiosonde, ceilometer, lidar, or a higher-resolution model, should be tested before adding complexity elsewhere. Yet the Sobol result does not prove causality from H alone. Interactions among H, the retrieved profile, local emissions, and spatial representativeness may dominate individual high-pollution episodes.

5.3. Role of the Plovdiv control

Plovdiv guards against attributing every winter mismatch to Sofia topography. If both cities show the same regime-conditioned failure after observational replacement, a product-wide retrieval or conversion issue is more plausible. If the deficit is concentrated in Sofia under the prespecified stagnation rule, basin-specific mixing and representativeness become stronger explanations. A single control city cannot establish generality, but it strengthens the design compared with a Sofia-only evaluation.

5.4. Replacement with observed data

The final analysis will replace each synthetic field without changing the schema or figures. The replacement sequence is:

1. ingest screened TROPOMI Level-2 pixels and preserve processor version, orbit, footprint, QA, and column precision;
2. collocate ERA5 boundary-layer height and wind at overpass time;
3. ingest validated EEA hourly NO_2, station metadata, and temporal aggregation records;
4. rerun the fixed regime rule, Monte Carlo sampler, coverage analysis, and Sobol design;
5. publish the data manifest, exclusions, random seed, and sensitivity settings with the revised figures.

No threshold or uncertainty range should be tuned on the final evaluation month. If calibration is required, it should use a separate period, followed by a locked evaluation on held-out days.

6. Limitations

The pilot simplifies chemistry, transport, vertical structure, and spatial representativeness. It does not model NO–NO_2–O_3 partitioning, photochemical lifetime, advection between source and pixel, free-tropospheric NO_2, or subpixel emission gradients. The ventilation term is empirical. ERA5 resolution may not resolve basin circulations or the true inversion top. EEA in-situ observations sample a small volume and may represent traffic or urban-background conditions differently from a TROPOMI footprint.

The baseline Monte Carlo design assumes independent inputs. In reality, Ω, H, and u can be correlated through the same meteorological regime, and retrieval error can covary with clouds and surface reflectance. Ignoring dependence can distort both interval width and Sobol attribution. The final analysis will therefore report an independence baseline, a rank-correlation sensitivity analysis,

and the resulting change in coverage endpoints. The first-order Sobol decomposition will remain restricted to the independent-input baseline.

Coverage estimates from one month have broad confidence intervals and serial dependence. Station-days from the same day share meteorology and satellite retrieval error, so a simple binomial interval is optimistic. The final analysis should use a day-block bootstrap and should report station-specific results before pooling. The prespecified thresholds describe stagnation but do not directly diagnose an inversion from a temperature profile. A radiosonde- or lidar-based inversion label would provide a stronger physical reference.

Finally, the current numbers are synthetic. They demonstrate the planned inference and expose potential failure modes, but they are not evidence about actual January 2021 coverage. Only the observational replacement can support conclusions about TROPOMI-derived surface NO_2 in Sofia.

7. Conclusions

The proposed workflow evaluates a central 90% Monte Carlo interval separately under shallow, weak-wind stagnation and ventilated boundary layers. In the synthetic Sofia verification dataset, coverage of 78.5% separates into 63.9% under stagnation and 87.7% under ventilation, while boundary-layer height accounts for 61% and 32% of first-order output variance, respectively. The analysis correctly recovers the deliberately embedded contrast and therefore verifies the implementation. It does not yet establish that the mixed-layer conversion under-covers real surface NO_2 observations.

The scientific test begins when collocated observations replace the synthetic fields. The two locked hypotheses ask whether stagnant coverage is lower than ventilated coverage and whether boundary-layer height contributes more first-order variance under stagnation. The reporting design keeps regime definition, uncertainty propagation, calibration, sharpness, and sensitivity attribution connected to the same station-day records and prevents the Plovdiv control from altering the primary Sofia estimate.

Data and code availability

The synthetic station-day table, random seed, and generated figures accompany the working manuscript in the SES 2026 project folder. The observational submission will archive the processing code, the data manifest, station aliases mapped to public EEA identifiers, TROPOMI processor versions, and all exclusion decisions in a citable repository, subject to the access conditions of the source services.

Acknowledgements

The authors acknowledge the European Space Agency and Copernicus programme for Sentinel-5P TROPOMI products, the Copernicus Climate Change Service for ERA5, and the European Environment Agency and Bulgarian monitoring authorities for air-quality data infrastructure. The final manuscript will add any project, computing, and data-provider acknowledgements required by the observational dataset.

References:

1. J. P. Veefkind et al., “TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 70–83, 2012. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027
2. J. van Geffen et al., “Sentinel-5P TROPOMI NO_2 retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 15, pp. 2037–2060, 2022. https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022
3. T. Verhoelst et al., “Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO_2 measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 14, pp. 481–510, 2021. https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021
4. V. Balamurugan, J. Chen, A. Wenzel, and F. N. Keutsch, “Spatiotemporal modeling of air pollutant concentrations in Germany using machine learning,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 23, pp. 10267–10285, 2023. https://doi.org/10.5194/acp-23-10267-2023
5. D. Griffin et al., “Development and validation of satellite-derived surface NO_2 estimates using machine learning versus traditional approaches in North America,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 18, pp. 7497–7511, 2025. https://doi.org/10.5194/amt-18-7497-2025
6. X. Zhao et al., “Retrieval of total column and surface NO_2 from Pandora zenith-sky measurements,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19, pp. 10619–10642, 2019. https://doi.org/10.5194/acp-19-10619-2019

7. S. Acker, T. Holloway, and M. Harkey, “Satellite detection of NO_2 distributions using TROPOMI and TEMPO and comparison with ground-based concentration measurements,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 25, pp. 8271–8288, 2025. https://doi.org/10.5194/acp-25-8271-2025
8. K. Ivanov and R. Evgeniev, “Temperature inversions and their relation to the air pollution in the city of Sofia,” *Journal of Environmental Protection and Ecology*, vol. 23, no. 2, pp. 441–453, 2022.
9. E. Hristova et al., “Black Carbon in Bulgaria: Observed and Modelled Concentrations in Two Cities for Two Months,” *Atmosphere*, vol. 13, article 213, 2022. https://doi.org/10.3390/atmos13020213
10. I. Kolev, P. Savov, B. Kaprielov, O. Parvanov, and V. Simeonov, “Lidar observation of the nocturnal boundary layer formation over Sofia, Bulgaria,” *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 19, pp. 3223–3235, 2000. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00490-2
11. D. Makariev and P. Trenchev, “Advanced Computational Approaches for Data-Driven and Intelligent Modeling of Atmospheric Processes,” in *Proceedings of the Twenty-first International Scientific Conference Space, Ecology, Safety, SES 2025*, Sofia, Bulgaria, 2025. https://space.bas.bg/SES/archive/SES%202025_DOKLADI/3_Remote%20Sensing/9_Makariev.pdf
12. D. Makariev and P. Trenchev, “Review of Contemporary Intelligent Methods for Atmospheric Process Modeling and a Proposed Hybrid Framework Integrating Earth System Digital Twins with Copernicus Observia AI,” *Aerospace Research in Bulgaria*, vol. 38, 2026. https://journal.space.bas.bg/arhiv/n%2038/Articles/25_Makariev.pdf
13. European Environment Agency, “Air Quality download service,” accessed 17 October 2026. https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/datahubitem-view/778ef9f5-6293-4846-badd-56a29c70880d
14. European Space Agency, “Copernicus Sentinel-5P TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products, Version 02,” 2021. https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8
15. J. H. G. M. van Geffen, H. J. Eskes, K. F. Boersma, and J. P. Veefkind, “TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO_2 data products,” S5P-KNMI-L2-0005-RP, issue 2.9.0, 2025. https://sentiwiki.copernicus.eu/__attachments/1673595/S5P-KNMI-L2-0005-RP%20-%20Sentinel-5P%20TROPOMI%20ATBD%20NO2%20data%20products%202025-2.90.pdf
16. H. Hersbach et al., “The ERA5 global reanalysis,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, pp. 1999–2049, 2020. https://doi.org/10.1002/qj.3803
17. R. P. Horner, E. A. Marais, N. Wei, R. G. Ryan, and V. Shah, “Vertical profiles of global tropospheric nitrogen dioxide (NO_2) obtained by cloud slicing the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI),” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 24, pp. 13047–13064, 2024. https://doi.org/10.5194/acp-24-13047-2024
18. V. A. Sinclair et al., “Boundary-layer height and surface stability at Hyytiälä, Finland, in ERA5 and observations,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 15, pp. 3075–3103, 2022. https://doi.org/10.5194/amt-15-3075-2022
19. F. Madonna, D. Summa, P. Di Girolamo, F. Marra, Y. Wang, and M. Rosoldi, “Assessment of Trends and Uncertainties in the Atmospheric Boundary Layer Height Estimated Using Radiosounding Observations over Europe,” *Atmosphere*, vol. 12, article 301, 2021. https://doi.org/10.3390/atmos12030301
20. T. Roy and H. Gupta, “How certain are our uncertainty bounds? Accounting for sample variability in Monte Carlo-based uncertainty estimates,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 136, article 104931, 2021. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104931
21. T. Gneiting and A. E. Raftery, “Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 102, pp. 359–378, 2007. https://doi.org/10.1198/016214506000001437
22. T. Gneiting, F. Balabdaoui, and A. E. Raftery, “Probabilistic forecasts, calibration and sharpness,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, vol. 69, no. 2, pp. 243–268, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2007.00587.x
23. A. Saltelli et al., “Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index,” *Computer Physics Communications*, vol. 181, pp. 259–270, 2010. https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018
24. A. Lorente et al., “Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI,” *Scientific Reports*, vol. 9, article 20033, 2019. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56428-5

GAP FILLING OF CLOUD-OBSCURED SATELLITE NO_2 DATA AS GEOMETRIC NAVIGATION ON A RECONSTRUCTED ATTRACTOR: A CONCEPTUAL FRAMEWORK

Plamen Trenchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ptrenchev@space.bas.bg

Keywords: *TROPOMI NO_2; gap filling; shadow manifold reconstruction; Stark embedding theorem; convergent cross mapping; analogue inference; forced nonlinear systems; missing not at random*

Abstract: *Cloud and quality screening removes approximately 65% of daily TROPOMI tropospheric NO_2 pixels. These gaps are not random: they coincide with the meteorological conditions that generate pollution episodes. We present a conceptual framework that treats urban NO_2 as a forced nonlinear dynamical system and replaces statistical interpolation with analogue inference in a reconstructed phase space. Continuous ground-based NO_2 and O_3 measurements, together with ERA5 meteorology, form a multivariate shadow manifold grounded in Stark's embedding theorem for forced systems. This manifold tracks the atmospheric state even when the satellite view is obscured by clouds. Missing values are reconstructed by transferring historical TROPOMI values from dynamically equivalent past states; no surface-to-column regression is trained. We develop two conceptual elements and their realisation. First, photolytic and boundary-layer coordinates act as forcing coordinates that prevent the mixing of incompatible regimes; an ablation on a synthetic forced system shows that removing the forcing coordinate doubles the phase separation between a target state and its retrieved analogues. Second, convergent cross mapping serves as a precondition on dynamical coupling rather than as post-hoc validation. We then set out the eight-stage realisation of the framework and the qualitative properties that distinguish it from pointwise-loss estimators. The framework was applied to ten European urban stations in Trenchev et al. (2026), where cross-map convergence was obtained for all 60 ablation configurations ($p < 0.001$). The present paper develops the reasoning behind that result.*

РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ПРОПУСКИТЕ В САТЕЛИТНИ ДАННИ ЗА NO_2, ПРИЧИНЕНИ ОТ ОБЛАЧНО ЕКРАНИРАНЕ, ЧРЕЗ ГЕОМЕТРИЧНА НАВИГАЦИЯ ВЪРХУ РЕКОНСТРУИРАН АТРАКТОР: КОНЦЕПТУАЛНА РАМКА

Пламен Тренчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ptrenchev@space.bas.bg

Ключови думи: *TROPOMI NO_2; попълване на пропуски; реконструкция на сенчести многообразия; теорема на Старк за вграждане; сходимо кръстосано отображение; аналогово заключение; принудителни нелинейни системи; липсващи данни, които не са случайни*

Резюме: *Премахването на облаците и проверката за качество елиминират приблизително 65% от ежедневните пиксели на TROPOMI за тропосферния NO_2. Тези пропуски не са случайни: те съвпадат с метеорологичните условия, които предизвикват епизоди на замърсяване. Представяме концептуална рамка, която разглежда градския NO_2 като принудена нелинейна динамична система и замества статистическата интерполация с аналогово заключение в реконструирано фазово пространство. Непрекъснатите наземни измервания на NO_2 и O_3, заедно с метеорологичните данни от ERA5, образуват многомерна сянкова многообразие, основана на теоремата на Старк за вграждане на принудени системи. Това многообразие проследява състоянието на атмосферата дори когато сателитният изглед е затъмнен от облаци. Липсващите стойности се реконструират чрез прехвърляне на исторически стойности от TROPOMI от динамично еквивалентни състояния от миналото; не се обучава регресия от повърхността към колоната. Разработваме два концептуални елемента и тяхната реализация. Първо, фотолитичните и граничнослоевите координати действат като координати на въздействието, които предотвратяват смесването на несъвместими режими;*

аблация върху синтетична система под въздействие показва, че премахването на координатата на въздействието удвоява фазовото разделяне между целевото състояние и възстановените му аналози. Второ, конвергентното кръстосано картографиране служи като предварително условие за динамичното свързване, а не като валидиране пост-хок. След това представяме осеметапната реализация на рамката и качествените свойства, които я отличават от оценяващите функции с точкова загуба. Рамката беше приложена към десет европейски градски станции в Trenchev et al. (2026), където беше постигната конвергенция на кръстосаното картографиране за всички 60 конфигурации на аблация ($p < 0,001$). Настоящата статия развива разсъжденията, стоящи зад този резултат.

1. Introduction

Satellite observations of tropospheric nitrogen dioxide from TROPOMI/Sentinel-5P [1] have become a primary source of information on urban air quality, offering daily global coverage at 3.5 × 5.5 km². The instrument is a passive sensor operating in the ultraviolet and visible range, and its tropospheric column retrieval is meaningful only when the light path between the sun, the boundary layer and the sensor is unobstructed. Cloud screening, surface albedo constraints and quality-assurance filtering [2, 3] together remove approximately 65% of daily pixels over a typical European urban station. For any application requiring a continuous record – trend estimation, exposure assessment, emission inversion, assimilation into a chemical transport model – that record must first be completed. The standard response is interpolation. Spatial and temporal kriging, climatological composites [4], and increasingly machine-learning regression of the satellite column on co-located surface and meteorological predictors [5] are all applied to this task. They differ in sophistication but share a structural assumption: that the relationship learned from the observed subset of the record transfers to the unobserved subset. Under random missingness this assumption is innocuous. Under the missingness regime that actually governs satellite air-quality data it is not.

Cloud cover is not a random sampling of atmospheric states. Low cloud, high humidity, frontal passage, shallow boundary layer and weak ventilation co-occur, and they co-occur precisely with the synoptic conditions under which urban NO_2 accumulates. The satellite is therefore systematically blind during the episodes that matter most. In the terminology of missing-data theory this is missing not at random [6]: the probability that a value is absent depends on the value itself.

This paper argues that the problem has been framed incorrectly. If urban NO_2 is treated not as a variable to be estimated but as the observable of a forced nonlinear dynamical system, the question changes form. It is no longer what value should be assigned to this timestamp, but which region of the system's state space was the atmosphere occupying at that moment, and has that region been visited before under compatible forcing. The first is a question of statistical estimation; the second is a question of geometry. Our central claim is that under non-ignorable missingness only the second is answerable from the data.

The empirical foundation for this argument is the station-level gap-filling framework published by the present authors in Trenchev et al. [7], which applies multivariate shadow manifold reconstruction to ten European urban stations and reports its configuration space and performance. The present contribution is different in kind. It is a conceptual synthesis: it extracts the theoretical reason why the approach behaves as it does, sets out the three structural elements that distinguish it from regression, describes the eight-stage processing architecture through which those elements are realised, and identifies the conditions under which the framing holds and the conditions under which it must fail. Performance results are not restated; the reader is referred to [7] for the full quantitative assessment.

2. Cloud Gaps Are Not Missing at Random

Rubin's taxonomy distinguishes three missingness regimes [6, 8]. Data are missing completely at random when the mechanism is independent of both observed and unobserved values; missing at random when it depends only on observed covariates; and missing not at random when it depends on the unobserved value itself. The three carry different licences. Under the first, complete-case analysis is unbiased. Under the second, conditioning on observed covariates restores unbiasedness. Under the third, no conditioning on observed quantities is sufficient, and any method proceeding as if the missingness were ignorable transfers the structure of the observed subset onto a population it does not describe.

Satellite NO_2 gaps sit in the third regime, and the mechanism is physical rather than instrumental. Retrieval requires sufficient photon return from below the cloud top, so cloud fraction and cloud radiance fraction above threshold cause rejection [3]. Cloudiness in the mid-latitude urban environment accompanies elevated humidity, reduced incoming shortwave radiation, suppressed convective mixing, and under winter anticyclonic–stratus conditions a shallow, stable boundary layer.

The same conditions reduce ventilation of the urban source and raise surface concentration. Missingness is thus correlated with the magnitude of the quantity being retrieved, through couplings well documented in boundary-layer meteorology [9].

Two consequences follow, and they differ in severity. The first is bias of the mean. If high-NO_2 days are preferentially absent, the clear-sky mean underestimates the true mean. This is widely recognised and partially correctable if the sampling probability can be modelled. The second is loss of the tail, and it is not correctable within the regression framing. A model fitted by minimisation of a pointwise loss on a clear-sky training set produces conditional expectations, and conditional expectations contract variance by construction: the predicted trajectory occupies a smaller volume of state space than the observed one. When the missing states are precisely the extreme states, the model must extrapolate into the region where its contraction is most severe, using a mapping never exposed to that region. The result is a completed record that is smooth, plausible, and well-behaved under conventional error metrics – and systematically devoid of the episodes for which it was completed.

This is the point at which the problem ceases to be one of estimator choice. No reweighting of the loss function and no increase in model capacity removes a deficiency that originates in the geometry of the training sample. What is required is a method whose inference does not pass through a fitted conditional mean at all.

3. Gap Filling as Geometric Navigation

3.1. The shadow manifold and Stark's embedding theorem

Consider the urban atmosphere above a monitoring station as a deterministic dynamical system driven by external forcing, with state evolving on a manifold M of unknown dimension. Neither state nor manifold is observable. What is observable is a set of scalar time series: ground-level NO_2 and O_3 from the continuous monitoring network, and meteorological variables from reanalysis [10]. Takens' theorem [11] and its generalisation by Sauer et al. [12] establish that for an autonomous system a delay-coordinate map built from a single generic observable is, for sufficiently large embedding dimension, a diffeomorphic image of M – a shadow manifold preserving its topology and neighbourhood structure.

The atmosphere is not autonomous. It is driven by the diurnal and seasonal solar cycle and by synoptic forcing external to the station-scale system. The relevant result is therefore not Takens' but Stark's extension to forced systems [13,14], which shows that the embedding property is retained for a skew-product system provided the forcing is itself represented in the reconstruction – through its own coordinates, or through observables carrying its signature. This requirement is not a technical refinement. It is the condition under which the reconstruction is a manifold at all, rather than a projection in which dynamically unrelated states are superimposed.

The multivariate form of the reconstruction [15] admits mixed coordinates drawn from several observables rather than lags of one. The resulting embedding – ground NO_2 and O_3 lags, meteorological coordinates, and forcing coordinates – defines a trajectory that continues to be traced during cloudy periods, because its constituent measurements are ground-based and continuous. The satellite record is absent on those days; the state estimate is not. This asymmetry is the operational core of the framework (Fig. 1).

Gap filling then proceeds as a transfer, not a fit. For a target time t at which an overpass occurred but was rejected by screening, the k nearest neighbours of the reconstructed state x(t) are located on the library manifold, restricted to past states at which a valid column was retrieved. The estimate is the exponentially distance-weighted mean of the historical column values attached to those neighbours,

$$(1) \qquad \hat{V} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \omega_i V(t_i)}{\sum_{i=1}^{N} \omega_i}, \; \omega_i = exp\left(-\frac{d_i}{d_1}\right)$$

with d_i the distance to the i-th neighbour in the embedding and d_1 that to the nearest. No functional relationship between surface concentration and tropospheric column is estimated, and none is assumed to exist. The inference is that two atmospheres occupying the same region of state space under the same forcing carry the same column. The estimate is a convex combination of observed historical values and is therefore bounded by the support the library has sampled; it does not extrapolate beyond that support, as a fitted mapping can. It is not, however, variance-preserving by construction – a distance-weighted mean of k analogues compresses variance relative to the true trajectory, which is why [7] applies an explicit variance-restoration step under random and covariate-dependent missingness.

This is analogue inference in the sense of nonlinear forecasting from reconstructed state space [16], and it differs from classical analogue prediction in three respects that matter here: neighbours are sought in a reconstructed multivariate space rather than in the space of raw observations; forcing coordinates constrain which neighbours are admissible (Section 3.2); and the existence of a shared dynamical substrate is tested before any transfer is performed (Section 3.3).

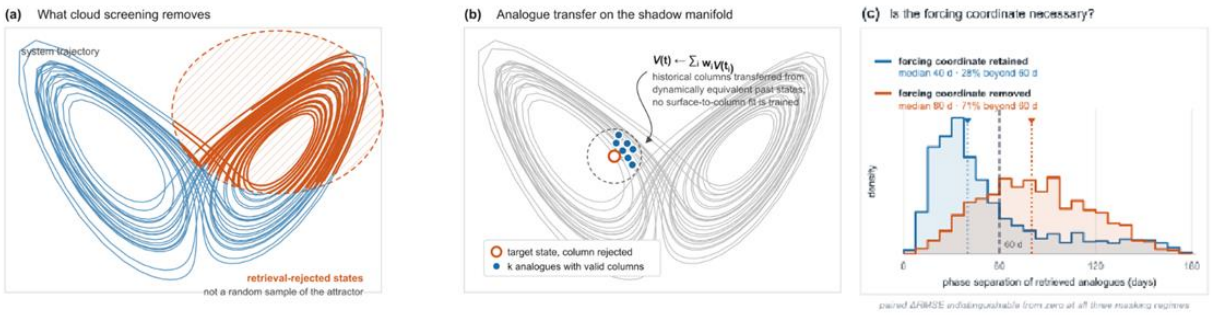


Fig. 1. Gap filling framed geometrically. (a) Cloud and quality screening does not sample the system's state space uniformly: the rejected states occupy a connected region of the attractor rather than a random subset, which is what makes the missingness non-ignorable. (b) In the shadow-manifold formulation the state at a rejected overpass remains reconstructible from continuous ground observables, and the column estimate is obtained by transferring historical values from the k dynamically nearest past states at which a valid retrieval exists; no surface-to-column relationship is estimated. (c) The forcing-coordinate requirement tested directly on a synthetic forced Lorenz-96 system: removing the forcing coordinate doubles the median circular phase separation between a target state and its retrieved analogues and raises the fraction of targets whose analogues come from a different part of the annual cycle from 28% to 71%. The panel shows one representative replicate (medians 40 d and 80 d); medians over the 20 replicates are 40 d and 79 d. Accuracy is unchanged, for the reason given in Section 3.4. The attractor silhouettes in (a) and (b) are schematic and carry no data

3.2. Forcing coordinates as regime separators

Two coordinates carry particular weight: a photolytic regime coordinate derived from solar geometry, and boundary-layer height.

The photolytic coordinate encodes the deterministic astronomical forcing. Without it, a December morning state and a June evening state with comparable surface NO_2 and comparable wind are geometrically adjacent, and the neighbour search treats them as dynamically equivalent. They are not: photochemical regime, mixing depth and the air-mass factor of the retrieval all differ.

Boundary-layer height enters for a different reason. It is the physical quantity linking surface measurement to column: a given surface concentration corresponds to a small column under deep mixing and a large one under a shallow inversion. It is therefore the coordinate along which the surface-column correspondence itself varies, and augmenting the embedding with it was found in [7] to be near-universally beneficial.

Forcing coordinates do not improve a fit; they restrict which library states may serve as analogues. Their role is exclusion, not explanation. Whether that exclusion also improves accuracy is a separate question, and Section 3.4 answers it directly.

3.3. Convergent cross mapping as a precondition

The framework rests on an assumption testable before any value is filled: that ground observables and satellite column are observables of a common dynamical system. If they are not – if station and overlying column are dynamically decoupled at the relevant scales – then neighbourhood in the reconstructed space carries no information about the column, and the transfer is unjustified however well it scores.

Convergent cross mapping [17] provides the test. Cross-map skill ρ(L) is computed as a function of library length L; a genuine shared attractor produces monotone increase and saturation, whereas a spurious or purely forcing-driven association produces a flat profile. Significance is assessed against surrogate ensembles [18]. The essential point is procedural: here CCM is applied before the filling step, so that a configuration failing to converge is declared inadmissible rather than reported with degraded accuracy. The test is graded rather than binary – cross-map skill ranks with coupling strength, and the rejection threshold is set by the surrogate null. No configuration has yet been rejected at the sites examined in [7], so the test has to date served as a verified precondition rather than as an active filter.

4. Realisation: An Eight-Stage Pipeline

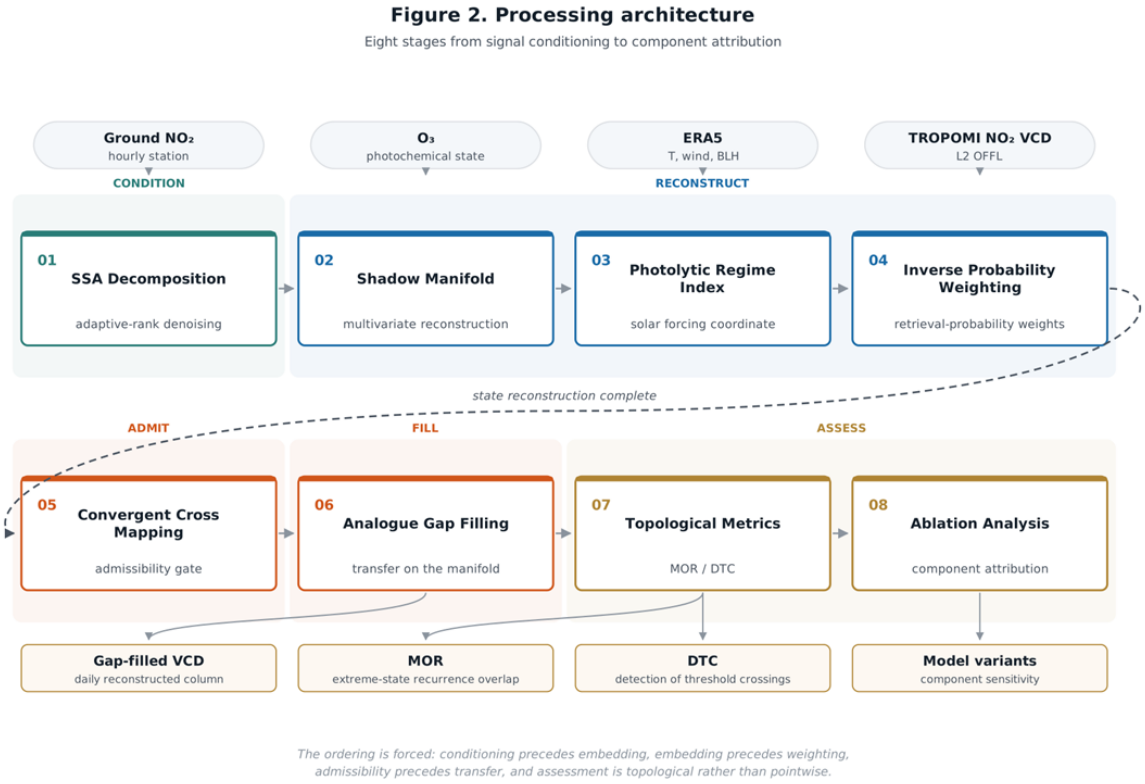


Fig. 2. Processing architecture. Inputs enter at the top and are transformed through eight stages into gap-filled columns and topology-aware validation metrics. The upper row reconstructs the atmospheric state: signal conditioning separates the deterministic component with the retained rank selected by prediction skill rather than by a variance threshold; multivariate shadow manifold reconstruction selects and ensembles candidate embeddings; the photolytic regime index and boundary-layer height enter as forcing coordinates; and inverse-probability weighting prevents the library from being dominated by the fair-weather regime. The lower row acts on that state: convergent cross mapping establishes admissibility before any value is filled, analogue transfer produces the estimate, topological metrics assess structural rather than pointwise fidelity, and ablation attributes each reported property to a specific component. MOR denotes the Manifold Overlap Ratio and DTC Dynamic Trend Capture

The three conceptual elements of Section 3 are realised in a sequence of eight stages (Fig. 2), each of which answers one well-posed question. The architecture is described here because the conceptual argument is only as good as its operational commitments: each stage corresponds to a decision that a reader could make differently, and naming them makes the framework falsifiable rather than merely plausible.

Signal conditioning. The continuous ground record carries instrument noise that would corrupt the neighbourhood structure of the embedding. Singular spectrum analysis separates the deterministic component, with the retained rank selected by a leave-one-out simplex-projection skill criterion rather than by a fixed variance threshold - the rank that best supports short-term prediction, not the one that explains most variance.

Manifold construction. Multivariate shadow manifold reconstruction searches a space of candidate embeddings, each a selection of source series and lags, and retains those with the best out-of-sample skill. Prediction is formed from an ensemble of top-ranked views rather than a single embedding, which both stabilises the estimate and avoids committing to one arbitrary reconstruction.

Forcing coordinates. The photolytic regime index and boundary-layer height enter here, in the role set out in Section 3.2.

Observation weighting. Because retrieval availability is itself state-dependent, library states are weighted by the inverse of their estimated retrieval probability, so that the library is not silently dominated by the fair-weather regime.

Admissibility. Convergent cross mapping against surrogate ensembles, applied as a gate (Section 3.3).

Transfer. Analogue retrieval and distance-weighted transfer of historical columns, as in Section 3.1.

Topological assessment. Two metrics address what conventional error measures do not. The Manifold Overlap Ratio (MOR) quantifies the overlap of recurrence structure between observed and reconstructed records in the extreme regime. Dynamic Trend Capture (DTC) quantifies agreement on exceedances above the 95th percentile, weighted by amplitude fidelity and by the ratio of predicted to observed spread. Both answer whether the completed record has the same dynamical structure as the original, not whether it is close to it pointwise. This distinction matters because a record can be accurate on average while being useless for the episodes it was completed to represent.

Ablation. Each configuration is re-run with components removed, so that every reported property can be attributed to a specific element rather than to the ensemble as a whole.

The ordering is not arbitrary. Conditioning must precede embedding, because a noisy series yields false neighbours; embedding must precede weighting, because weights are defined on reconstructed states; admissibility must precede transfer, because a transfer across an unverified coupling is not interpretable; and assessment must be topological rather than pointwise, because the framework's claim is about structure. A pipeline in which these stages were reordered would not implement the same argument.

5. Qualitative Properties of the Geometric Formulation

Four properties follow from the formulation rather than from tuning, and each was observed across the ten stations examined in [7].

Abstention in place of spurious skill. Where no dynamically compatible analogue exists in the library, the method returns no estimate. At one station in [7] this led to a reported absence of results rather than a number, which was treated as the correct output. A regression returns a numerically well-formed value under identical circumstances, and nothing in its output distinguishes that case from an informed one.

Availability at every overpass. Lag-feature regression requires a complete predictor vector and silently declines to predict when preceding observations are themselves missing; in the winter test subset of [7] a substantial fraction of candidate overpasses was lost for this reason. The geometric formulation requires only that the current state be reconstructible and a compatible neighbourhood exist, and produced an estimate at every overpass. Under non-ignorable missingness the days on which lag-based predictors fail are not a random subset either.

Retention of extreme structure. Across all stations, ablations and missingness regimes examined in [7] – more than 3600 evaluations - no non-dynamical reference method (random forest on full and meteorology-only predictor sets, persistence, climatology, linear interpolation) attained a Manifold Overlap Ratio above 0.104, while the dynamical method never fell below 0.59. The two distributions are separated by a factor exceeding five at their closest approach, with no overlap.

Bias as a diagnostic rather than a defect. Where the library spans the dynamical regimes present in the evaluation period, bias is negligible. Where the system has drifted outside it – through a change in emission baseline, or a combination of heating regime and circulation absent from the historical record – a systematic bias appears whose sign indicates the direction of the drift. For an analogue method this is the correct behaviour: the bias is a statement that the attractor sampled by the library is no longer the attractor being sampled by the atmosphere.

6. Limits and Conditions of Validity

The framework substitutes a continuously observed shadow manifold for the interrupted satellite view. Where no such ground record exists, the state during the gap is unknown and there is nothing to navigate. This restricts the approach to station-level application and to networks with high temporal completeness. It is not a spatial gap-filling method and should not be presented as one.

The deeper constraint is library coverage. A transfer-based estimate exists only if a dynamically equivalent past state has been observed under valid retrieval conditions. The method cannot extrapolate; it can only report that no admissible analogue exists. This is a limitation, but a transparent one.

An attempt to mitigate regime drift by temporal down-weighting of older library states was tested in [7] and did not succeed: no weighting achieved a meaningful bias reduction without a disproportionate accuracy penalty. The negative result is instructive. The library is a geometric object whose value lies in its coverage of state space, and preferentially discarding its older regions reduces that coverage faster than it reduces the regime mismatch.

Finally, the framework inherits the predictability limits of the underlying system. Where local dynamics are low-dimensional and strongly constrained, neighbourhoods are tight and transfer is accurate. Where they are high-dimensional and weakly constrained, neighbourhoods are diffuse and the estimate degrades. The method does not promise uniform skill and should not be evaluated as if it did.

7. Conclusions

Cloud-induced gaps in satellite NO_2 records are missing not at random, and the missingness mechanism is physically coupled to the pollution episodes the record is used to study. Under this regime the question of what value to assign to a missing observation is not answerable by estimation from the observed subset, because the observed subset does not sample the relevant region of state space.

We have argued that the question should be reformulated geometrically: whether the atmospheric state at the missing timestamp is reachable from the observed history, and if so, which historical states it is dynamically equivalent to. This reformulation rests on Stark's embedding theorem for forced systems, requires forcing coordinates to prevent inadmissible analogue matches, admits an operational precondition on dynamical coupling through convergent cross mapping, and is realised in an eight-stage architecture whose ordering follows from the argument itself.

The framework's principal limitation, dependence on library coverage, is also its principal epistemic advantage: it abstains where it cannot know.

References:

1. Veefkind, J.P.; Aben, I.; McMullan, K.; Förster, H.; de Vries, J.; Otter, G.; Claas, J.; Eskes, H.J.; de Haan, J.F.; Kleipool, Q.; et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sens. Environ. 2012, 120, 70–83.
2. Eskes, H.J.; van Geffen, J.; Boersma, K.F.; Eichmann, K.-U.; Apituley, A.; Pedergnana, M.; Sneep, M.; Veefkind, J.P.; Loyola, D. Sentinel-5 Precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen Dioxide; Document S5P-KNMI-L2-0021-MA; KNMI: De Bilt, The Netherlands, 2022.
3. van Geffen, J.; Eskes, H.; Compernolle, S.; Pinardi, G.; Verhoelst, T.; Lambert, J.-C.; Sneep, M.; ter Linden, M.; Ludewig, A.; Boersma, K.F.; Veefkind, J.P. Sentinel-5P TROPOMI NO_2 retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. Atmos. Meas. Tech. 2022, 15(7), 2037–2060.
4. Gerber, F.; de Jong, R.; Schaepman, M.E.; Schaepman-Strub, G.; Furrer, R. Predicting missing values in spatio-temporal remote sensing data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018, 56(5), 2841–2853.
5. Lary, D.J.; Alavi, A.H.; Gandomi, A.H.; Walker, A.L. Machine learning in geosciences and remote sensing. Geosci. Front. 2016, 7(1), 3–10.
6. Rubin, D.B. Inference and missing data. Biometrika 1976, 63(3), 581–592.
7. Trenchev, P.; Avetisyan, D.; Dimitrova, M.; Trencheva, E. Station-level gap filling of TROPOMI NO_2 via physics-informed shadow manifold reconstruction. Remote Sens. 2026, 18(14), 2387. https://doi.org/10.3390/rs18142387
8. Little, R.J.A.; Rubin, D.B. Statistical Analysis with Missing Data, 3rd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2019.
9. Seibert, P.; Beyrich, F.; Gryning, S.-E.; Joffre, S.; Rasmussen, A.; Tercier, P. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. Atmos. Environ. 2000, 34(7), 1001–1027.
10. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; et al. The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020, 146(730), 1999–2049.
11. Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence. In Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980; Rand, D., Young, L.-S., Eds.; Lecture Notes in Mathematics 898; Springer: Berlin, Germany, 1981; pp. 366–381.
12. Sauer, T.; Yorke, J.A.; Casdagli, M. Embedology. J. Stat. Phys. 1991, 65(3–4), 579–616.
13. Stark, J. Delay embeddings for forced systems. I. Deterministic forcing. J. Nonlinear Sci. 1999, 9(3), 255–332.
14. Stark, J.; Broomhead, D.S.; Davies, M.E.; Huke, J. Delay embeddings for forced systems. II. Stochastic forcing. J. Nonlinear Sci. 2003, 13(6), 519–577.
15. Deyle, E.R.; Sugihara, G. Generalized theorems for nonlinear state space reconstruction. PLoS ONE 2011, 6(3), e18295.
16. Sugihara, G.; May, R.M. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. Nature 1990, 344, 734–741.
17. Sugihara, G.; May, R.; Ye, H.; Hsieh, C.-h.; Deyle, E.; Fogarty, M.; Munch, S. Detecting causality in complex ecosystems. Science 2012, 338(6106), 496–500.
18. Theiler, J.; Eubank, S.; Longtin, A.; Galdrikian, B.; Farmer, J.D. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. Physica D 1992, 58(1–4), 77–94.

COMPARATIVE EVALUATION OF VALIDATION APPROACHES FOR WATER BODY MAPPING USING PLANETSCOPE IMAGERY

Adrian Yordanov

University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy
e-mail: a.yordanov_fgs@uacg.bg

Keywords: *PlanetScope; water-body mapping; spatial cross-validation; shoreline detection; model generalization*

Abstract: *This paper uses one PlanetScope dataset (14 four-band acquisitions from 2023 over one study area, with 31 water bodies digitised manually on the PlanetScope images and checked against the nearest-date high-resolution images in Google Earth) and a random-forest classifier with eight fold-selected features. With the classifier held fixed, 4 different validation strategies were compared – group-shuffle and leave-one-out validation, grouped by scene or by water body – on a shared set of sampled pixels. Scored on identical samples, holding out whole scenes and holding out single water bodies gave IoU values within one point of each other (94.1% and 95.0%). Reported accuracy changed far more with the averaging method and the choice of land samples. Under leave-one-waterbody-out, pooled IoU was 95.0%, but the per-object mean was 73.8% (median 85.7%). Per-object IoU rose with the number of water samples (Spearman ρ = 0.85), the three smallest water bodies scored below 5%, and one water body held 72% of the water samples. The same scene-held-out predictions labelled 3.9% of land pixels as water across whole scenes, but 19.6% near shorelines. This paper aims to show that reporting the grouping unit, the averaging method and the land-sampling scheme, and giving both pooled and per-object scores, provides important information about the models. All data come from one region, so transfer to new areas remains untested.*

ОЦЕНКА НА РАЗЛИЧНИ ПОДХОДИ ЗА ВАЛИДАЦИЯ ПРИ КАРТИРАНЕ НА ВОДНИ ТЕЛА ОТ ИЗОБРАЖЕНИЯ PLANETSCOPE

Адриан Йорданов

Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия
e-mail: a.yordanov_fgs@uacg.bg

Ключови думи: *PlanetScope; water-body mapping; spatial cross-validation; shoreline detection; model generalization*

Резюме: *В настоящата статия е използван набор от 14 четириканални изображения PlanetScope от 2023 г. за район между Плевен и Севлиево с 31 водни тела, векторизирани ръчно върху изображенията PlanetScope и проверени спрямо най-близките по дата изображения с висока разделителна способност в Google Earth. Класификацията е извършена с алгоритъма „Случайна гора“ обучен с 8 признака избирани независимо за всяко обучение. При един и същ класификатор са сравнени 4 различни метода за валидация на модела – случаен групов набор и изключване на един елемент, с групиране по изображение и по водно тяло – върху общ набор от пикселни извадки. При оценяване върху идентични извадки, изключването на цели изображения и на единични водни тела довежда до промяна в стойностите на коефициента на Джакард под 1 процентен пункт (94.1% и 95.0%). Отчетената точност се променя значително в зависимост от метода на осредняване и от избора на извадки от сушата. При изключване на единично водно тяло, обединената стойност на коефициента на Джакард е 95.0%, а средната стойност, по обекти, е 73.8% (медианата е 85.7%). Отчетена е и висока степен на корелация между нарастване на стойностите на коефициента на Джакард пропорционално на нарастването на броя извадки за дадено водно тяло (ρ на Спиърман от 0.85). Трите най-малки водни тела имат стойности под 5%, а едно от водните тела заема 72% от общия брой извадки. При изключване на цели изображения, 3.9% от пикселните извадки за сушата са класифицирани като вода в рамките на цялото изображение, докато в районите около бреговата линия, процентът нараства на 19.6%. Настоящата статия цели да акцентира, че посочването на единицата за групиране, метода на осредняване и начина на формиране на извадките от сушата, заедно с представянето на обединени и на осреднени по обекти стойности, дава по-пълна представа за качеството на модела. Всички данни са от един район, поради което устойчивостта на модела към други територии не е проверена.*

1. Introduction

Reviews of remote-sensing accuracy assessment show that sampling designs and metric definitions are often reported incompletely [Morales-Barquero et al., 2019; Maxwell et al., 2021], yet these choices can change the reported accuracy of a classifier. Good practice for the reference sample, the response and the analysis is well documented [Stehman and Foody, 2019]. A single headline number is still often quoted without the details a reader needs to interpret it.

Neighboring pixels in a satellite image are spatially correlated. If pixels are split at random into training and test sets, neighbors end up on both sides and the measured accuracy is optimistic [Roberts et al., 2017; Ploton et al., 2020; Karasiak et al., 2022]. Grouped validation avoids this by holding out whole units. For water-body mapping the unit can be an image or a water body, and it is not obvious which is the better choice. Two more choices change the reported score: which samples are scored, land samples in particular, and how the scores of units of different size are averaged. Errors concentrate along shorelines, the zone that remote-sensing contour mapping of lakes targets [Yordanov and Atanasova-Evdenova, 2025]. Small water bodies are also routinely mapped from PlanetScope imagery [Mullen et al., 2023], so these choices are likely to matter for this kind of data.

The paper doesn't aim to rank validation designs. With the classifier and the samples held fixed, the question is how much the reported IoU depends on three things: the grouping unit, the land samples in the scored set, and the averaging method (pooled or per unit). On this dataset the grouping unit changes the pooled IoU by less than one point and the choice of scored land samples by about one point, whereas averaging per water body changes it by more than twenty. These results lead to a short list of items that should accompany any reported accuracy.

2. Data and study area

The study area lies between Pleven and Sevlievo, Bulgaria. It contains 31 water bodies: one reservoir and 30 ponds, of which 5 are large (above 50,000 m²), 6 medium (10,000–50,000 m²), 10 small (5,000–10,000 m²) and 9 very small (below 5,000 m²) (Fig. 1). The data are 14 four-band (blue, green, red, near-infrared) PlanetScope images from 2023, with a pixel size of 3 m, dated 2 and 19 January, 19 February, 13 March, 13 April, 7 May, 20 June, 21 July, 20 August, 12 September, 15 October, 14 November, 4 December and 28 December. All are surface reflectance products harmonized with Sentinel-2.

The reference data were vectorized manually on the PlanetScope images and checked against the nearest-date high-resolution images in Google Earth. Polygons are drawn separately for every scene, which accounts for changes in size between dates and for seasonal water bodies. Each water body keeps one persistent integer ID across scenes. Twenty-nine water bodies are present in all scenes; two are strongly seasonal and almost absent in some. An ID contributes to a scene only where it has sampled pixels, so some water bodies appear in only one or two scenes.



Fig. 1. Study area with the 31 water bodies

3. Methodology

3.1. Classifier

The classifier is a Random Forest with 500 trees, the square root of the number of features tried at each split, and the Gini criterion. It used eight features in every experiment, selected independently inside each training fold from the raw bands and from derived features (differences, normalized differences, ratios and proportions of band pairs), so no information from the held-out units reaches feature selection. In the 14 leave-one-scene-out folds seven features were chosen every time; the eighth was the green–blue difference in 10 folds and the green–red difference in 4. All features were selected based on ranking using average precision, F1-score and Fisher score and a correlation filtering between every possible feature and the already selected ones. The correlation threshold for choosing a new feature was set to 0.95. The classifier is the same in all designs. Only the way training and test data are separated changes.

3.2. Samples and classes

Reference polygons were rasterized and split into four classes with morphological operations. A 6 m buffer, which is 2 pixels at 3 m (converted with the raster transform), separates the classes. Interior water is the reference water shrunk by 2 pixels. Water boundary is the remaining 2-pixel ring of reference water. Land boundary, or shoreline land, is the 2-pixel ring of land found by dilating the reference water by 2 pixels and removing the two water classes. Land interior is all other land. Every scene supplied a fixed quota: 33,000 interior-water, 5,000 water-boundary, 5,000 land-boundary and 33,000 land-interior pixels. The 14 scenes give 1,064,000 samples with a nominal water-to-land ratio of 1:1. Pixels were drawn at random with a minimum spacing of 4 pixels, relaxed to 2 and then to 0 pixels when a quota could not be filled. All samples are kept in one table, one row per sample, with scene ID, water-body ID, and pixel and global coordinates. Land-interior samples carry water-body ID 0.

3.3. Validation designs

Four designs were compared on the same table of samples: leave-one-scene-out (14 folds, 988,000 training samples each), leave-one-water-body-out (31 folds), and group-shuffle by scene and by water body (10 random splits each, with 4 test scenes or 3 test water bodies per split). Training and test groups are always disjoint. The designs leak different information. With a scene held out, the same water bodies remain in training through the other dates. With a water body held out, the same dates remain in training through the other water bodies. The held-one-out designs use all datasets except one and loop until all individual datasets were used once as validation. For the image one-held-out design, 1 dataset is equal to 1 image while for the waterbody design, 1 dataset is 1 waterbody. For the group-shuffle design, a number of iterations is defined (in this study – 10) and a number of held-out datasets as well (for images – 3 and for waterbodies – 4). Each iteration consists of choosing the defined number of held-out datasets at random and using them for validation excluding them from training. Some of the held-out datasets can appear in more than 1 iteration.

The scored rows differ between designs. A leave-one-scene-out fold is scored on all 76,000 samples of the scene. A leave-one-water-body-out fold is scored on the samples of the held-out water body: its water samples and the nearby land-boundary samples attributed to it. Land-interior samples carry ID 0, are never held out and so are never scored in this design. To compare the designs on identical samples, leave-one-scene-out was also scored on these shared rows, that is, on all water samples and the shoreline land samples (532,000 water and 70,000 land samples over all folds).

3.4. Metrics

Water is the positive class. Accuracy is reported as the intersection over union (IoU, Jaccard index):

(1) $IoU = TP / (TP + FP + FN),$

where TP, FP and FN are the numbers of true positive, false positive and false negative samples. The pooled IoU sums TP, FP and FN over all folds before applying (1). The per-unit IoU applies (1) to the held-out samples of one scene or one water body, and is summarized by the unweighted mean, median and minimum over units. Per-unit scores exist for leave-one-scene-out (14 scenes) and leave-one-water-body-out (31 water bodies); the group-shuffle designs are reported as pooled values only. For water bodies, the Spearman correlation between per-object IoU and the number of water samples is also given. The false-water rate is the share of land samples predicted as water in the leave-one-scene-out predictions. It was calculated over all land samples, over land-interior samples and over shoreline (land-boundary) samples.

4. Results

4.1. Grouping unit and scored rows

On all 76,000 samples of each scene, leave-one-scene-out gave a pooled IoU of 93.0% (Table 1). On the shared rows it gave 94.1%, against 95.0% for leave-one-water-body-out, a gap of less than one point. Dropping the land-interior samples from the scored set moves the leave-one-scene-out score by 1.2 points, as much as switching the grouping unit does. Group-shuffle gave 92.8% for scenes with 1.05% standard deviation (SD) and 89.0% for water bodies with 2.94% SD. The six-point gap between group-shuffle by water body and leave-one-water-body-out has a likely cause. Each split holds out only three of the 31 water bodies, and the largest one, which holds most of the water samples and scores well, was not among them in this run. The pooled score then rests on smaller water bodies, which score lower.

Table 1. IoU (%) of the two leave-one-out designs. Per-unit values are on the shared rows.

Design	Units	Pooled, all rows	Pooled, shared rows	Mean per unit	Median per unit	Min per unit
Leave-one-scene-out	14 scenes	93.0	94.1	94.1	94.3	90.9
Leave-one-water-body-out	31 water bodies	n/a	95.0	73.8	85.7	0.0

4.2. Pooled and per-unit scores

For scenes, pooling and averaging agree: the pooled IoU is 94.1% and the mean per-scene IoU is also 94.1% (median 94.3%, range 90.9–96.7%). For water bodies they do not. The pooled IoU is 94.96%, the mean of the 31 per-object IoUs is 73.8% and the median is 85.7%. The reason is unit size. Every scene contributes the same quota of 38,000 water samples, while the water bodies range from 35 to about 381,000 water samples, and the largest holds 72% of them. The pooled value mostly reflects that one water body. Per-object IoU rises with the number of water samples (Spearman ρ = 0.85, Fig. 2), and the three smallest water bodies score below 5%. Averaging therefore matters only when units differ strongly in size, and the equal quota per scene hides that difference for the scene unit.

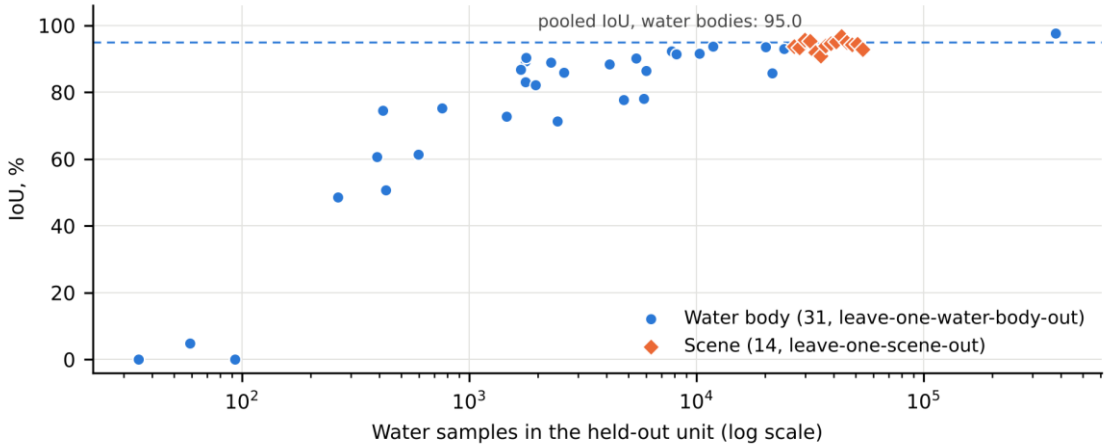


Fig. 2. IoU of each held-out unit (shared rows) against its number of water samples. Dashed line: pooled IoU of leave-one-water-body-out. Scene points are shifted horizontally for visibility.

4.3. Land samples

In the leave-one-scene-out predictions, 3.9% of all land samples were labeled as water (20,535 of 532,000). The rate was 1.5% for land-interior samples (6,789 of 462,000) and 19.6% for shoreline samples (13,746 of 70,000). Shoreline samples are 13% of the land samples but produce 67% of the false positives. Leave-one-water-body-out gives a similar shoreline rate of 19.3% (13,495 of 70,000), so this error does not depend on the grouping unit. A score computed mostly from distant land samples hides it. The scene of 13th of April shows how much: its IoU is 85.1% on all rows and 92.0% on the shared rows. The shoreline ring is 2 pixels (6 m) wide, about the size of the positional error of manual digitizing and of a mixed pixel, so part of the 19.6% may be label uncertainty and not model error. This was not tested.

5. Discussion

Three choices that are rarely reported changed the IoU by very different amounts here. The grouping unit moved it by less than one point (94.1% and 95.0%), the scored land samples by about one point (93.0% and 94.1%), and averaging over water bodies by more than twenty (94.96% and 73.8%). Neither the pooled nor the per-unit score is wrong; they answer different questions. The pooled score weights every sample equally and so reflects the largest water body. The per-object mean weights every water body equally and so reflects the small ones, where the model is least accurate. Readers cannot tell which was used unless the paper says so. Whether the two differ depends on how unequal the units are, and for scenes that is set by the sampling quota, not by the landscape. Details beyond the unit matter too: group-shuffle by water body differed from leave-one-water-body-out by six points although both hold out water bodies.

At least four things should be reported: the grouping unit and the number of folds or splits; the rows that were scored, with their class composition (here 532,000 water against 70,000 land samples); pooled and per-unit scores side by side, with the number and size range of the units; and separate scores for the shoreline zone. This study has clear limits: one area, one year, one classifier and manual reference polygons. The group-shuffle designs were not scored per unit. Transfer to other areas was not tested, and a test of that kind should first assess the area of applicability of the model [Meyer and Pebesma, 2021].

6. Conclusion

On PlanetScope imagery of one region, holding out scenes or single water bodies gave pooled IoU values within one point of each other (94.1% and 95.0%), and adding land-interior samples to the scored set changed the leave-one-scene-out score by a similar amount (93.0%). Averaging per water body lowered the reported accuracy from 94.96% to 73.8%, because the water bodies differ so much in size. Shoreline land had a false-water rate of 19.6%, against 1.5% for interior land. Reports of water-body mapping accuracy should state the grouping unit, the scored rows and the averaging method, and give both pooled and per-unit scores.

7. Acknowledgements

This research was financially supported by the Research and Design Centre at the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy (UACEG) under Contracts No. D-173/2026.

References:

1. Karasiak, N. et al. Spatial dependence between training and test sets: another pitfall of classification accuracy assessment in remote sensing. Machine Learning, 111, 2022, pp. 2715–2740.
2. Maxwell, A. E. et al. Accuracy assessment in convolutional neural network-based deep learning remote sensing studies – Part 1: Literature review. Remote Sensing, 13(13), 2021, 2450.
3. Meyer, H., E. Pebesma. Predicting into unknown space? Estimating the area of applicability of spatial prediction models. Methods in Ecology and Evolution, 12(9), 2021, pp. 1620–1633.
4. Morales-Barquero, L. et al. Trends in remote sensing accuracy assessment approaches in the context of natural resources. Remote Sensing, 11(19), 2019, 2305.
5. Mullen, A. L. et al. Using high-resolution satellite imagery and deep learning to track dynamic seasonality in small water bodies. Geophysical Research Letters, 50, 2023, e2022GL102327.
6. Ploton, P. et al. Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. Nature Communications, 11, 2020, 4540.
7. Roberts, D. R. et al. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. Ecography, 40(8), 2017, pp. 913–929.
8. Stehman, S. V., G. M. Foody. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. Remote Sensing of Environment, 231, 2019, 111199.
9. Yordanov, A., T. Atanasova-Evdenova. Remote sensing-based contour mapping of Burgas lake. София: УАСГ, 2025, pp. 843–864.

КОЛИЧЕСТВЕН ПРОСТРАНСТВЕН АНАЛИЗ НА НАВОДНЕНИЯ И РАСТИТЕЛНА ДИНАМИКА ПО ДАННИ ОТ SENTINEL-1 И LANDSAT В GOOGLE EARTH ENGINE

Михайло Мураш

Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките
e-mail: m.murash@mail.space.bas.bg

Ключови думи: *дистанционно изследване на Земята, Sentinel-1, SAR, Landsat, NDVI, Google Earth Engine, наводнения, пространствен анализ*

Резюме: *Представен е количествен пространствен анализ на два различни по времеви мащаб процеса с използване на отворени спътникови данни и Google Earth Engine: наводнението в Емилия-Романя (Италия) през май 2023 г. и дългосрочната динамика на растителната покривка в 30-километрова зона за анализ около Чернобилската АЕЦ. За наводнението са използвани Sentinel-1 GRD, VH-поляризация, еднаква низходяща орбита (relative orbit 95) и емпиричен индекс на промяна. При праг 1,25 са картографирани 1807,13 ha наводнени територии; след векторизация са идентифицирани 564 пространствено свързани фрагмента, като 73,0% са под 1 ha, но 74,4% от общата площ е концентрирана във фрагменти ≥ 10 ha. За Чернобил са анализирани летни композити от Landsat 5 (1986, 2000), Landsat 7 (2012) и Landsat 8/9 (2025) върху обща валидна площ 165524,8 ha. Средният NDVI нараства от 0,605 до 0,743, а площта с NDVI > 0,6 – от 98875,5 до 145136,5 ha (1,468 пъти). Резултатите показват приложимостта на облачни геоинформационни среди за възпроизводим количествен анализ на бързи хидроложки събития и дългосрочни промени в земната покривка.*

QUANTITATIVE SPATIAL ANALYSIS OF FLOODING AND VEGETATION DYNAMICS USING SENTINEL-1 AND LANDSAT DATA IN GOOGLE EARTH ENGINE

Mykhailo Murash

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: m.murash@mail.space.bas.bg

Keywords: *Earth observation, Sentinel-1, SAR, Landsat, NDVI, Google Earth Engine, flooding, spatial analysis*

Abstract: *This study presents a quantitative spatial analysis of two processes operating at different temporal scales using open satellite data and Google Earth Engine: the May 2023 flood in Emilia-Romagna, Italy, and long-term vegetation cover dynamics within a 30-km analytical study zone around the Chernobyl Nuclear Power Plant. Flood mapping uses Sentinel-1 GRD data with VH polarisation, a common descending orbit (relative orbit 95), and an empirical change index. A threshold of 1.25 yields 1807.13 ha of flooded land. Vectorisation identifies 564 spatially connected patches: 73.0% are smaller than 1 ha, whereas patches ≥ 10 ha account for 74.4% of the total area. For Chernobyl, summer composites from Landsat 5 (1986, 2000), Landsat 7 (2012), and Landsat 8/9 (2025) are analysed over a common valid area of 165524.8 ha. Mean NDVI increases from 0.605 to 0.743, while the area with NDVI > 0.6 grows from 98875.5 to 145136.5 ha, a factor of 1.468. The results demonstrate the applicability of cloud-based geospatial environments to reproducible quantitative analysis of rapid hydrological events and long-term land cover change.*

1. Въведение

Отворените архиви на спътникови данни и облачните среди за геопространствен анализ създават възможност за възпроизводимо изследване както на краткотрайни екстремни събития, така и на промени в земната покривка в многогодишен мащаб. Google Earth Engine (GEE) интегрира големи архиви от дистанционни изследвания с облачна изчислителна

инфраструктура и е широко използван за анализ на природни бедствия, води, растителност и земеползване [1].

В настоящото изследване са обединени два самостоятелни казуса. Първият е наводнението в Емилия-Романя през май 2023 г., когато Copernicus Emergency Management Service активира Rapid Mapping EMSR664 за оценка на залетите територии и нанесените щети [2]. Поради плътната облачност радарните данни Sentinel-1 са подходящ източник за картографиране на наводнения, тъй като C-band SAR наблюдението не зависи от слънчевото осветление и прониква през облаци. Вторият казус е дългосрочната промяна на растителната покривка в района на Чернобилската зона на отчуждение, където ограничаването на стопанската дейност след 1986 г. е последвано от значителни промени в земната покривка и естествено залесяване на изоставени земеделски площи [3].

Целта е да се разработи и демонстрира единна, възпроизводима GEE-базирана схема за количествен пространствен анализ, която включва: (1) картографиране и фрагментен анализ на наводнени територии чрез Sentinel-1 SAR; и (2) сравним многогодишен анализ на NDVI и площите на спектрални класове по Landsat. Акцентът е поставен върху числените характеристики – обща площ, размер и разпределение на пространствените фрагменти, средни и медианни стойности на NDVI и площи на класове.

2. Данни и методи

Всички операции са изпълнени в Google Earth Engine. Използвани са отворени колекции Sentinel-1 GRD, Landsat Collection 2 Level 2 Surface Reflectance, JRC Global Surface Water и цифров модел на релефа HydroSHEDS. За да се осигури възпроизводимост, областите на анализ, времевите интервали, орбиталните параметри, праговете и правилата за маскиране са зададени експлицитно в скриптовете.

2.1. SAR-картографиране на наводнението в Емилия-Романя

Изследваната област обхваща сектора Conselice-Lavezzola-Alfonsine и е зададена като фиксиран правоъгълник 11,76–12,09° E и 44,45–44,60° N с площ 436,35 km². От колекцията COPERNICUS/S1_GRD са избрани изображения в режим IW, VH-поляризация, 10 m пространствена резолюция, низходяща орбита и относителна орбита 95 (relative orbit 95). За състоянието „преди“ е използвана сцена Sentinel-1A от 28.04.2023 г., а за „след“ – сцена от 22.05.2023 г. Използването на еднаква посока на орбитата и относителна орбита намалява различията, свързани с геометрията на наблюдение.

С цел редуциране на спекъл-шума е приложено пространствено осредняване с радиус 50 m. В съответствие с възпроизведената процедура на UN-SPIDER [4] е изчислен емпиричен индекс на промяна като отношение AFTER/BEFORE директно върху dB-стойностите и е използван праг 1,25. Тъй като dB е логаритмична величина, този показател не представлява физическо отношение на мощностите и прагът 1,25 не следва да се интерпретира като 25% изменение на обратното разсейване; в настоящото изследване той се използва единствено като емпиричен критерий за съществена промяна между двете SAR наблюдения. Постоянните водни площи са отстранени чрез JRC Global Surface Water при seasonality ≥ 10 месеца годишно [5]. Допълнително са изключени пиксели с наклон ≥ 5° и изолирани групи с по-малко от 8 пиксела при осемсвързана съседност. Подобни схеми за откриване на промени са широко използвани за автоматизирано SAR-картографиране на наводнения [4, 6].

Финалната бинарна маска е векторизирана при 10 m. За всеки пространствено свързан фрагмент е изчислена площта, след което обектите са групирани в шест класа: < 1, 1–5, 5–10, 10–50, 50–100 и ≥ 100 ha. Освен общата залята площ са определени броят фрагменти, средна и медианна площ, максимален фрагмент и относителният принос на всеки размерен клас.

2.2. Многогодишен NDVI-анализ около Чернобилската АЕЦ

За втория казус е създадена 30-километрова буферна зона около Чернобилската АЕЦ по предварително зададена и възпроизводима геометрична процедура, след което е пресечена с държавната граница на Украйна. Тази геометрия е използвана единствено като зона за анализ и не представлява официалната административна граница на Чернобилската зона на отчуждение. Анализирани са летни сцени за периода юни-август: Landsat 5 TM за 1986 г. (14 сцени) и 2000 г. (11 сцени), Landsat 7 ETM+ за 2012 г. (11 сцени) и обединена колекция Landsat 8 OLI + Landsat 9 OLI-2 за 2025 г. (30 сцени). Landsat 7 е използван за 2012 г., тъй като редовните наблюдения на Landsat 5 приключват през май 2012 г.

За всяка сцена са приложени QA_PIXEL и QA_RADSAT маски за облаци, облачни сенки, сняг, запълващи и наситени пиксели. Каналите за повърхностна отражателна способност (Surface Reflectance) са мащабирани с коефициент 0,0000275 и отместване -0,2. NDVI е изчислен по класическото определение [7]:

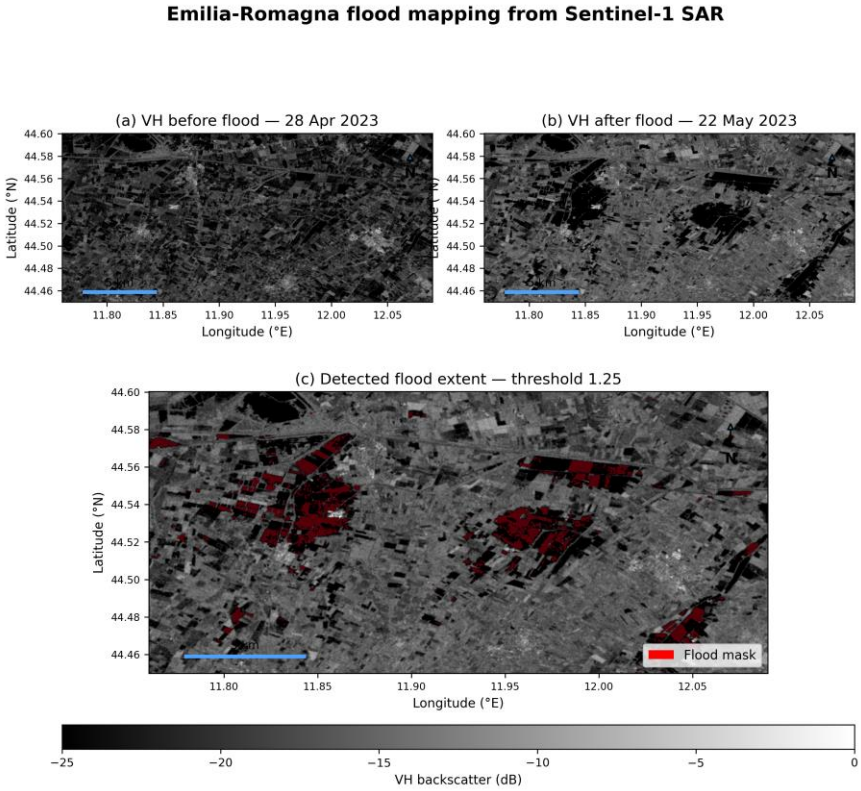
(1) $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$

За Landsat 5/7 са използвани RED = SR_B3 и NIR = SR_B4, а за Landsat 8/9 – RED = SR_B4 и NIR = SR_B5. За всяка година е съставен медианен летен композит. За да бъде времевото сравнение пространствено еднозначно, е формирана обща маска от пиксели с валиден NDVI и през четирите години, след изключване на постоянните водни площи. Така общата валидна площ е 165524,8 ha. NDVI е разделен в класове < 0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8 и ≥ 0,8. Площта с NDVI > 0,6 е използвана като индикатор за плътна зелена растителност, но не се интерпретира като еквивалент на клас „гора“.

3. Резултати

3.1. Наводнение в Емилия-Романя

При праг 1,25 финалната растерна маска показва 1807,13 ha наводнена площ, което представлява приблизително 4,14% от изследваната област. Пространственият модел се характеризира с компактни залети масиви в земеделската равнина около Conselice, Lavezzola и Alfonsine и съответства по общо местоположение на зоните, за които по активация EMSR664 са изготвени Copernicus EMS продукти за Lugo и Ravenna [2]. Съпоставянето тук е пространствено и качествено; не е извършено пикселно валидиране спрямо официалните векторни продукти за очертаване и оценка на щетите. Радарните изображения „преди“ и „след“, заедно с финалната аналитична маска, са представени на Фиг. 1.



Фиг. 1. Sentinel-1 VH преди (28.04.2023) и след (22.05.2023) наводнението и финална аналитична маска при праг 1,25. Източник: Sentinel-1 GRD; изчисление на автора в Google Earth Engine.

След векторизация са получени 564 фрагмента с обща площ 1803,18 ha. Разликата спрямо растерната оценка е 3,95 ha (0,22%), което показва добра вътрешна съгласуваност на растерно-векторното преобразуване. Най-големият фрагмент е 305,57 ha, средната площ е 3,20 ha, а медианата е едва 0,41 ha. Значителната разлика между средната стойност и медианата показва силно дясно асиметрично разпределение. Обобщените показатели по размерни класове са представени в Таблица 1.

Таблица 1. Разпределение на наводнените фрагменти по площ

Клас, ha	Брой	Дял от броя, %	Площ, ha	Дял от площта, %
< 1	412	73,0	114,86	6,37
1–5	100	17,7	218,39	12,11
5–10	18	3,2	128,34	7,12
10–50	29	5,1	660,73	36,64
50–100	3	0,5	178,10	9,88
≥ 100	2	0,4	502,76	27,88
Общо	564	100,0	1803,18	100,0

Малките обекти доминират по брой: 412 фрагмента (73,0%) са под 1 ha, но заемат само 6,37% от общата векторизирана площ. Обратно, едва 34 фрагмента с площ ≥ 10 ha представляват около 6,0% от броя на обектите, но акумулират 74,4% от наводнената площ. Следователно пространствената картина е фрагментирана по брой обекти, но площта се контролира от относително малък брой големи залети масиви. Разпределението по размерни класове е показано на Фиг. 2.



Фиг. 2. Разпределение на наводнените фрагменти: (a) брой по размерни класове; (b) дял от общата наводнена площ. Източник: авторски изчисления.

3.2. Динамика на NDVI в 30-километрова зона за анализ около Чернобилската АЕЦ

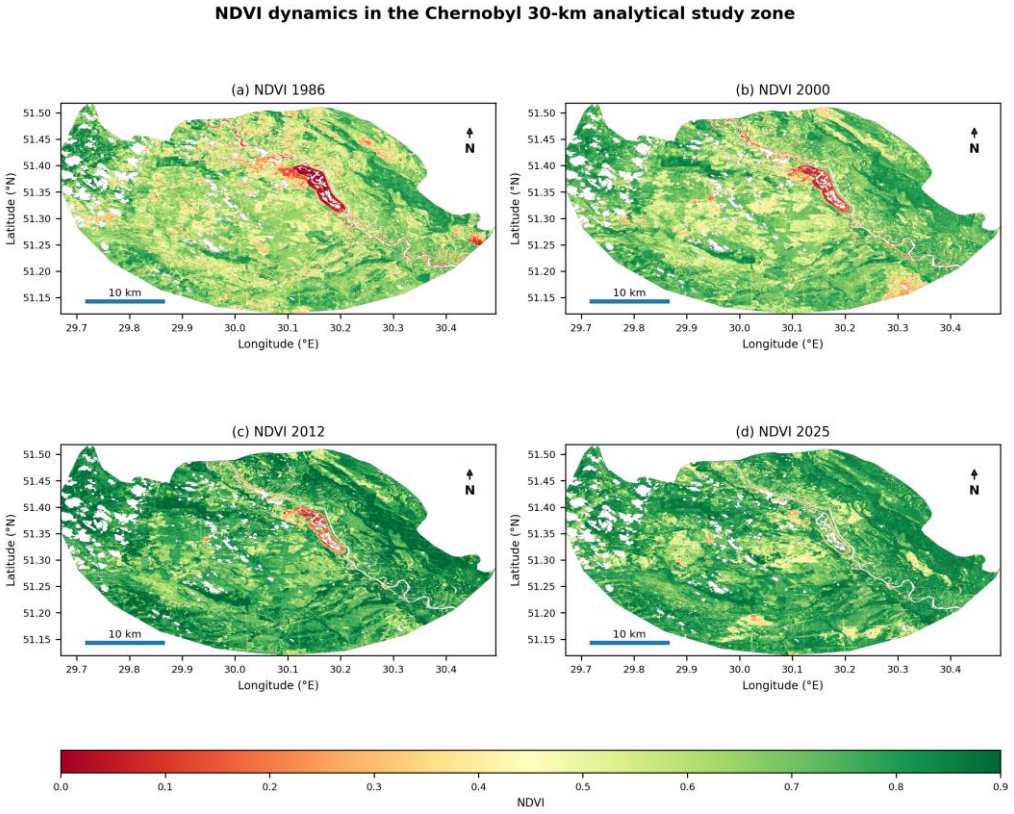
Картите на NDVI показват ясно увеличаване на площите с по-високи стойности на индекса между 1986 и 2012/2025 г. (Фиг. 3). Средният NDVI се увеличава от 0,605 през 1986 г. до 0,656 през 2000 г. и достига 0,761 през 2012 г., след което намалява слабо до 0,743 през 2025 г. Медианата се изменя аналогично: 0,629 → 0,691 → 0,785 → 0,777. Следователно резултатът показва изразен дългосрочен нетен растеж, но не и строго монотонна динамика. Обобщените показатели са представени в Таблица 2.

Таблица 2. Обобщени показатели за NDVI и плътната растителност

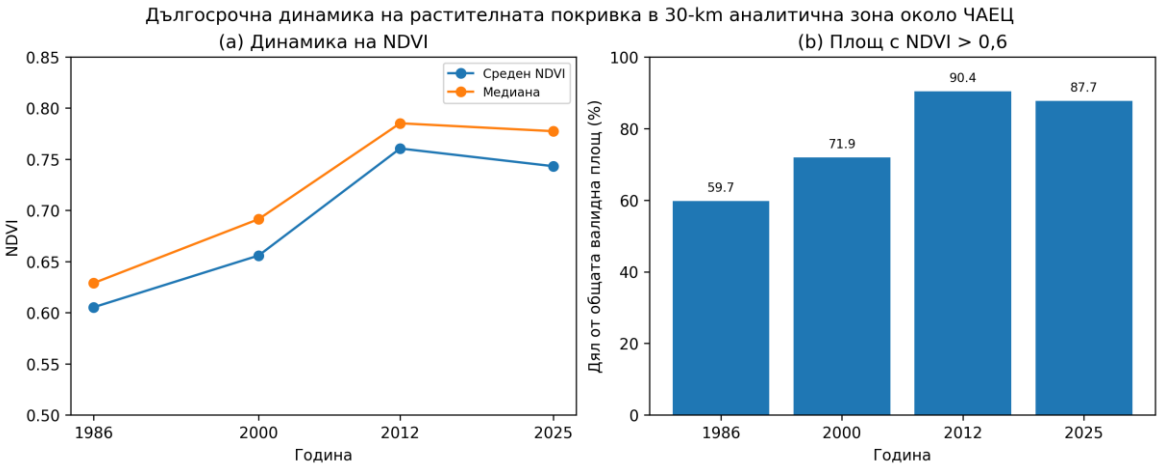
Година	Сензор	Mean NDVI	Median NDVI	NDVI >0,6, ha	Дял, %
1986	Landsat 5 TM	0,605	0,629	98875,5	59,7
2000	Landsat 5 TM	0,656	0,691	119000,2	71,9
2012	Landsat 7 ETM+	0,761	0,785	149647,9	90,4
2025	Landsat 8/9 OLI	0,743	0,777	145136,5	87,7

Площта с NDVI > 0,6 се увеличава от 98875,5 ha (59,7% от общата валидна площ) през 1986 г. до 145136,5 ha (87,7%) през 2025 г. Това съответства на увеличение 1,468 пъти или 46,8%. Най-високата стойност се наблюдава през 2012 г. – 149647,9 ha (90,4%). Паралелно делът на класа NDVI ≥ 0,8 нараства от 6,8% през 1986 г. до 40,9% през 2025 г., докато класът 0,4–0,6 намалява от 30,4% до 10,6%. Получената промяна е съпоставима по направление и порядък с резултата на Matsala et al. [3], които установяват увеличение на горската покривка от 41% през 1986 г. до около 59% през 2020 г. Въпреки това двата показателя не са еквивалентни:

NDVI > 0,6 включва и плътна тревиста/храстова растителност и не представлява тематична класификация на гора. Динамиката на средния и медианния NDVI и на дела на площите с NDVI > 0,6 е показана на Фиг. 4.



Фиг. 3. NDVI в 30-километрова зона за анализ около Чернобилската АЕЦ: (a) 1986, (b) 2000, (c) 2012 и (d) 2025 г. Всички панели са с еднаква скала и обща маска от валидни пиксели.
Източник: Landsat Collection 2 Level 2; изчисление на автора в Google Earth Engine.



Фиг. 4. Динамика на (a) средния и медианния NDVI и (b) дела на площите с NDVI > 0,6.
Източник: авторски изчисления.

4. Обсъждане

Двата казуса показват различни силни страни на отворените данни за ДИЗ. Sentinel-1 позволява анализ на наводнения при облачни условия и осигурява достатъчна пространствена детайлност за фрагментен анализ на залетите територии. Landsat от своя страна предоставя дълъг архив, който позволява съпоставяне на състояния през почти четири десетилетия. Общата GEE-среда улеснява възпроизводимото комбиниране на архиви, QA-маски, допълнителни геоданни и последващи площни статистики.

При SAR-казуса най-чувствителният параметър е прагът на индекса на промяна. Диагностичният тест показа плавно намаляване на картографираната площ при увеличаване на прага, докато маските за постоянни води, наклон и пространствена свързаност променят резултата значително по-слабо. Това налага прагът 1,25 да се разглежда като операционен параметър на конкретната процедура, а не като универсална физическа граница. Допълнителна неопределеност произтича от използването на единични изображения „преди“ и „след“; многовременни композити биха намалили влиянието на краткотрайни промени в обратното разсейване.

При Чернобил основното ограничение е, че са сравнени четири летни композита, а не непрекъснат годишен времеви ред. Малки разлики могат да бъдат повлияни от междусезонна вариабилност, спектралните характеристики на TM/ETM+/OLI и SLC-off режима на Landsat 7. Общата маска от валидни пиксели намалява пространственото изкривяване, но не елиминира напълно междусензорните различия. Наблюдаваното слабо понижение между 2012 и 2025 г. не противоречи на дългосрочния нетен растеж и е съвместимо с наличието на големи пожари и други нарушения в зоната след 2012 г., описани и в специализираната литература [3]. За по-строг анализ следва да се използва официалната граница на зоната и плътен годишен ред с алгоритми за времева сегментация, например LandTrendr.

5. Заключение

Разработената схема демонстрира възможността чрез отворени спътникови данни и Google Earth Engine да се извличат не само картографски изображения, но и възпроизводими количествени показатели за пространствената структура и динамиката на наблюдавани процеси. За наводнението в Емилия-Романя са картографирани 1807,13 ha залята площ и 564 свързани фрагмента, като 74,4% от общата площ е концентрирана във фрагменти ≥ 10 ha. За 30-километровата зона за анализ около Чернобилската АЕЦ средният NDVI се увеличава от 0,605 през 1986 г. до 0,743 през 2025 г., а площта с NDVI > 0,6 – 1,468 пъти. Получените резултати потвърждават приложимостта на интегрираните SAR и оптични подходи за количествен анализ на бързи бедствени събития и дългосрочни промени в земната покривка. Следващ етап е количествена валидация на SAR-маската с Copernicus EMS и разширяване на Landsat анализа до непрекъснат годишен времеви ред.

Литература:

1. Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 2017, pp. 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
2. Copernicus Emergency Management Service. Information Bulletin 167 - The Copernicus Emergency Management Service activities following the latest floods in Emilia Romagna. Copernicus EMS On Demand Mapping, 5 June 2023; Rapid Mapping Activation EMSR664.
3. Matsala, M., A. Bilous, V. Myroniuk, D. Holiaka, D. Schepaschenko, L. See, F. Kraxner. The Return of Nature to the Chernobyl Exclusion Zone: Increases in Forest Cover of 1.5 Times Since the 1986 Disaster. Forests, 12(8), 2021, 1024. https://doi.org/10.3390/f12081024
4. UN-SPIDER Knowledge Portal. Recommended Practice: Flood Mapping and Damage Assessment Using Sentinel-1 SAR Data in Google Earth Engine. United Nations Office for Outer Space Affairs. https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-google-earth-engine-flood-mapping (accessed 14.10.2026)
5. Pekel, J.-F., A. Cottam, N. Gorelick, A.S. Belward. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 540, 2016, pp. 418-422. https://doi.org/10.1038/nature20584
6. Twele, A., W. Cao, S. Plank, S. Martinis. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. International Journal of Remote Sensing, 37(13), 2016, pp. 2990–3004. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304
7. Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Vol. I, Sec. A, NASA SP-351, 1974, pp. 309–317.

МЕТОДИКА ЗА ТЕРМАЛНО ДИСТАНЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВРЪЗКАТА МЕЖДУ ПОДЗЕМНИТЕ И ПОВЪРХНОСТНИТЕ ВОДИ С БЕЗПИЛОТНА ЛЕТАТЕЛНА СИСТЕМА

Борислав Борисов

Геологически институт „Страшимир Димитров“ – Българска академия на науките
e-mail: bobiborisov@abv.bg

Ключови думи: *термално дистанционно изследване; подземни води; повърхностни води; безпилотна летателна система; теренна проверка*

Резюме. *Представена е методика за откриване и проверка на участъци с вероятен обмен между подземни и повърхностни води чрез съвместно използване на термални и видими изображения от безпилотна летателна система. Методиката обхваща предварителен хидрогеоложки анализ, избор на време за заснемане, планиране на полетите, обработка на изображенията, пространствено тълкуване и теренна проверка. Температурните аномалии се оценяват спрямо близък фонов участък и се проследяват в последователни изображения. При водни повърхности се отчитат ограниченията на геометричното съвместяване. Измервания на температурата и електропроводимостта на водата, както и данни за геоложкия строеж, се използват за разграничаване на подземно дрениране от засенчване, растителност и други смущения. Методът служи за локализиране на зони за подробни хидрогеоложки изследвания, но самостоятелният термален сигнал не доказва произхода или дебита на водата.*

METHODOLOGY FOR UAV THERMAL REMOTE SENSING OF GROUNDWATER–SURFACE WATER INTERACTIONS

Borislav Borisov

Geological Institute “Strashimir Dimitrov” – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: bobiborisov@abv.bg

Keywords: *thermal remote sensing; groundwater; surface water; unmanned aircraft system; field validation*

Abstract. *A methodology is proposed for detecting and verifying possible groundwater-surface water exchange zones using combined thermal and visible imagery acquired by an unmanned aircraft system. The workflow comprises hydrogeological reconnaissance, selection of observation times, flight planning, image processing, spatial interpretation, and field verification. Thermal anomalies are evaluated against nearby background areas and across consecutive frames. The limitations of image matching over moving or uniform water surfaces are explicitly considered. In situ measurements of water temperature and electrical conductivity, together with geological information, help distinguish groundwater discharge from shading, vegetation, and other confounding factors. The resulting maps guide targeted hydrogeological investigations. A thermal contrast alone does not establish groundwater origin or quantify discharge.*

Въведение

Температурата е полезен индикатор за локализиране на обмена между подземни и повърхностни води, когато между двата водни компонента съществува достатъчен топлинен контраст. Пренасянето на топлина от подземните води дава информация за движението им и може да допълни хидравличните и хидрохимичните наблюдения (Anderson, 2005). Термалните изображения позволяват бърз преглед на брегове, речни участъци и влажни зони, но установената аномалия има повече от едно възможно обяснение (Deitchman & Loheide, 2009; Mundy et al., 2017). Снимането с безпилотна летателна система (БЛС) улеснява

пространственото проследяване на малки температурни структури и избора на точки за последваща теренна проверка (Dugdale, 2022; Watts et al., 2023).

В България дистанционните изследвания с БЛС се прилагат в различни направления на екологичния и териториалния мониторинг. Chanev et al. (2024) използват изображения от БЛС за оценка на органично отглеждан лимец и показват значението на периода на заснемане и пространственото агрегиране на данните при съпоставянето им с наземни показатели. Приложението на БЛС за наблюдение на диви животни е разгледано в обзора на Chanev et al. (2023), наред със спътниковите изображения, фотокапаните и GPS проследяването. Приложението на БЛС с термален и видим канал за разпознаване на геоложки структури е представено от Shopov et al. (2021). Работата на Gerginov (2021) показва значението на геоложката хетерогенност за оценката на подземния водообмен. Тези изследвания дават основания термалната информация да се тълкува заедно с геоложките и теренните данни. Целта на настоящата статия е да формулира възпроизводима последователност на работа, разработена въз основа на дисертационно изследване, без да представя непроверени термални аномалии като доказани извори.

Предварителен хидрогеоложки анализ

Преди заснемането се събират геоложки и хидрогеоложки карти, сведения за извори, водоносни хоризонти, пукнатинни и карстови структури, речната мрежа и сезонното изменение на водните нива. За речен участък се отбелязват посоката на течението, потенциалните зони на притоци и местата с възможен обмен през дъното и брега. За езеро се разглеждат бреговата морфология, връзките с околните водоносни тела и колебанията на водното ниво. Пространственото съпоставяне на геология, релеф и водосбор е разработено за оценка на подхранването на подземни води в България от Vasileva (2019). Тук то се използва като предварителен индикатор, а не като доказателство за локален извор.

Термалната аномалия се очаква на границата между води с различни температури. Тя може да отсъства при реално дрениране, когато температурите са сходни, разходът е малък или обменът е под повърхностния слой. В речен басейн оценка на дела на подземното подхранване от хидрографа може да даде независим контекст за теренните наблюдения. Пример от България е изследването на Vasileva et al. (2017) за горното течение на Осъм. Тази оценка обаче се отнася до водосбор и сама по себе си не посочва конкретно място на изтичане.

Показателен за съчетаването на регионален модел и измервания на място е примерът от Опицвет-Драговищенския карстов басейн. Gerginov & Orehova (2010) използват воден баланс, хидрогеоложка карта и измервания на температура и електропроводимост в Драгоманското блато за уточняване на зоните, подхранвани с карстови води. Този подход е приложим като независима проверка на локалните термални признаци. Възможната посока на обмена се съпоставя с хидравличните напори и геоложките условия, преди термалният контраст да се свърже с карстово дрениране.

Оборудване и планиране на обследването

Методиката е разработена за мултикоптерна БЛС с термална и видима камера, например DJI Mavic 3 Thermal. При нея термалният канал е с матрица 640 × 512 пиксела и спектрален диапазон 8–14 μm (DJI, 2026). Точността на отчетената температура зависи от режима на камерата, емисивността, отразеното излъчване и условията на наблюдение. Спецификациите на RTK оборудването описват точността на позициониране на БЛА при определени условия, но сами по себе си не удостоверяват точността на крайния термален ортомозаечен продукт. За повишаване на геометричната точност на получените ортоизображения се използват наземни опорни точки (GCP), като значение имат техният брой и пространственото им разпределение (Sanz-Ablanedo et al., 2018).

Изборът на време започва с анализ на очакваната температура на подземната вода, дневния ход на температурата на повърхностните води, метеорологичните условия и огряването на терена. Ранните сутрешни и късните следобедни часове могат да повишат контраста, но оптималният час се определя за всеки обект с предварителни измервания. Повторни заснемания при различни сезонни условия помагат да се провери устойчивостта на аномалията. Силен вятър, валежи, вълнение и променяща се облачност се документират, защото влияят върху сигнала и сравнимостта на кадрите.

Сезонният избор се обвързва и с режима на изворите. Анализът на Damyanova (2021) на карстовите извори от националната мрежа показва колко различни могат да бъдат условията на наблюдение и наличните режимни данни в отделните карстови басейни. При високи води се търси по-широк обхват на активни изтичания, а при ниски води се проверява

дали локалните сигнали се запазват. Това е работна постановка, която зависи от конкретния обект. Сравняването на два сезона без данни за нивото и дебита може да доведе до погрешен извод за отсъствие на дрениране.

Полетите се планират по успоредни линии с припокриване, съобразено с особеностите на брега, терена и необходимата детайлност. Препоръчителни ориентировъчни стойности са над 80% надлъжно и над 70–80% напречно припокриване. Те подлежат на корекция според действителната текстура и качеството на изображенията. Вертикалните кадри осигуряват обща пространствена свързаност, а наклонените допълват огледа на брегови откоси и места с предполагаемо изтичане. За всеки полет се съхраняват оригиналните термални данни, часът, използваните настройки, височината спрямо терена, метеорологичните наблюдения и информацията за позиционирането.

При планирането се взема предвид различната пространствена разделителна способност на видимата и термалната камера. Термалната стъпка на терена зависи от височината и зрителния ъгъл на термалния канал. Тя не се приравнява към размер на най-малкия разпознаваем извор. Ако предполагаемият приток заема малка част от пиксела, средната отчетена температура се смесва с температурата на околната повърхност. Избират се достатъчно ниска височина и подходяща геометрия на обзора според размера на търсените структури и ограниченията за безопасен полет.

Обработка и тълкуване

Изображенията във видимия диапазон се обработват за получаване на георефериранa подложка. Термалните кадри се проверяват за изместени изображения, наситени участъци и промени в настройките. При наличие на подходящи радиометрични данни се изчисляват температурни разлики между предполагаемата зона на дрениране и близка контролна зона, заснета при сходен ъгъл и в близък час. Разлика между два пиксела сама по себе си не е достатъчна. Анализира се формата на петното, връзката му с бреговата линия, устойчивостта му между кадрите и поведението му във времето (Mundy et al., 2017; Ozotta & Gerla, 2021).

Водната повърхност често е еднообразна и подвижна, което затруднява автоматичното съвместяване на термалните кадри. Затова положение на аномалия се проверява по видими устойчиви ориентири върху сушата и, при съмнение, по отделните оригинални изображения. Термичните граници не се приемат автоматично за геометрични граници на водоносен хоризонт. В географска информационна система (ГИС) се съпоставят термалният сигнал, видимият образ, геоложката карта, релефът, водните обекти и точките от теренните измервания.

Съчетаването на ГИС, изображения от БЛС и фотограметрия по метода Structure from Motion (SfM) намира приложение и при пространственото документиране на археологически обекти (Ciocani et al., 2025). В настоящата методика ГИС осигурява обща пространствена основа за съпоставяне на изображенията и теренните наблюдения.

За сравняване на два полета се използват едни и същи или ясно описани контролни участъци и се отчита промяната в часа на заснемане, сезона и водното ниво. Представят се както абсолютните отчетени температури при посочени настройки, така и разликата спрямо локалния фон. Температурната палитра на визуализацията не се използва като измервателен критерий. Пространственият обхват на аномалията се очертава с отчитане на преходните пиксели по границите и различната разделителна способност на каналите. Когато образите от отделни полети не са пряко сравними, сравнението се ограничава до устойчивостта на мястото и формата на сигнала, без да се извежда тенденция в дебита.

Контрол на температурните измервания и неопределеност

Контролът на радиометричните данни се разглежда като отделен етап преди очертаването на аномалиите. Kelly et al. (2019) установяват, че при изпитаната нерадиометрична камера, условията по време на полета влияят върху температурния дрейф и пространствената еднородност на сигнала. Тези резултати не се пренасят като числена оценка за DJI Mavic 3 Thermal, но обосновават необходимостта от проверка на конкретната камера в реалните условия на обследване. Предлага се преди основния полет да се направи кратка серия над устойчиви контролни повърхности, след стабилизиране на камерата съгласно указанията на производителя. Проверява се дали отчетените температури се изменят във времето при приблизително постоянни условия. Кадри непосредствено преди и след автоматична корекция на нееднородността се съпоставят за възможни прекъсвания в температурния ред. Ако се установи системно отклонение, неговото отстраняване се документира и не се заменя с настройване на цветовата палитра.

При обследване на реки особено значение има разграничаването между пространствена температурна структура и отклонение, възникнало по време на полета. Dugdale et al. (2019) показват, че термалните изображения могат да локализират отделни топлинни притоци, докато дрейфът на сензора ограничава надеждността на абсолютните температури. Поради това в предложената методика всяка предполагаема аномалия се проверява в няколко припокриващи се оригинални кадъра. Проследява се дали петното остава свързано с една и съща географска позиция или следва положението си в изображението. Повтарящо се отклонение към края на кадъра може да насочва към инструментален ефект. При възможност се изпълнява повторно преминаване над избрани участъци, което позволява да се оцени възпроизводимостта на сигнала. За сравнение се подбират кадри с близка геометрия на наблюдение, тъй като промяната на ъгъла може да измени отражението от водната повърхност.

(1) $$\Delta T = T\text{а} - T\text{ф}$$

За представяне на локалния контраст се предлага използване на разликата по формула (1), където Та е представителната температура на избрания участък, а Тф – на съседна фонова зона в същия кадър. За представителна стойност може да се използва медианата на валидните пиксели, като се посочват броят им и диапазонът на температурите. Контролната зона се избира при сходни условия на осветеност, растителност и наблюдение. В анализа се избягват единични крайни пиксели и смесени пиксели по бреговата линия. Не се задава универсален праг на ΔT за всички обекти – разглеждат се изменчивостта на фона, повторяемостта между кадрите и разликата спрямо наземните измервания. Практическият критерий е сигналът да се отличава от характерните колебания в контролните зони и да има независимо хидрогеоложко обяснение.

Неопределеността се описва отделно за температурата и за пространственото положение. При наземна проверка се записват дълбочината на температурния датчик, часът и разстоянието до наблюдаваното петно – температурата под водната повърхност може да се различава от термално отчетената повърхностна температура. Геометричната проверка използва независими контролни точки върху устойчиви теренни елементи, когато такива са налични. При недостатъчно надеждно съвместяване се записва приблизителното положение на аномалията и се планира допълнителна проверка. Пространствената резолюция, точността на позициониране и температурната точност се представят като различни характеристики. Тази последователност позволява ограниченията да бъдат проследени до конкретния етап на получаване на данните и подпомага избора на участъци за повторно обследване.

Теренна проверка и ограничения

Подбраните аномалии се посещават на терен. В предполагаемата зона и в контролните участъци се измерват температурата и електропроводимостта на водата. При възможност се записват pH, водно ниво и признаци за движение на водата. Измерванията се извършват квазисинхронно и се съпоставят със сезонния хидроложки режим. Съчетаването на термален образ и наземно измерване е необходимо за надеждна интерпретация на просмукване на води и извори (Deitchman & Loheide, 2009; Watts et al., 2023).

За всяка проверена точка се съставя кратък запис с координати, дата и час, снимка от терена, положение спрямо брега, измервания в аномалията и контролния участък и оценка за алтернативни обяснения. При достъпни брегове може да се проследи температурата по напречен профил от сушата към водата. Електропроводимостта подпомага разграничаването на различни водни маси само когато техните стойности действително се различават, като сходна електропроводимост не отхвърля дренирането. Ако е необходим дебит, се планира отделно измерване на разхода или водния баланс, вместо да се пресмята от площта на топлинното петно.

За обекти с известни извори се събират и публикувани режимни сведения, но се проверява дали водовземане или инженерни съоръжения не са променили естествения отток. Benderev (2022) разглежда комплексното документиране на значими карстови извори, включително карти, снимки и количествени сведения. При термалното обследване същият принцип помага наблюдаваният сигнал да се свърже с ясно описан обект, а не само с точка върху изображението.

Охлаждане или затопляне може да възникне от сянка, различни свойства на дъното и брега, плитчина, водна растителност, изпарение, локален приток на повърхностна вода или антропогенен източник. Студените аномалии през лятото и топлите през зимата са полезни ориентири, но знакът на температурната разлика не е универсален критерий. Съществено ограничение е, че камерата отчита излъчването от наблюдаваната повърхност и не измерва пряко температурата на подземната вода под нея. Потвърждаването на посоката и интензивността на обмена изисква допълнителни хидрогеоложки наблюдения или количествени методи (Mundy et al., 2017; Dugdale, 2022).

Оценка и представяне на резултатите

След теренната проверка участъците се описват по една и съща схема. Като вероятно подземно дрениране се разглежда устойчив пространствен сигнал, разположен на хидрогеоложки обосновано място, за който теренните измервания показват съответстваща разлика в температурата или електропроводимостта и не е установено по-вероятно повърхностно обяснение. Когато част от тези признаци липсват, участъкът остава зона за допълнителна проверка. Когато сигналът съвпада с постоянна сянка, изкуствен източник или не се възпроизвежда при сходни условия, той не се приема за доказано дрениране. Това е качествена класификация и тя не замества количествена оценка на вероятността.

Крайният продукт включва карта на обследваните участъци с означени дати на заснемане, контролни зони и проверени точки; подбрани термални и видими кадри със съпоставим обхват; таблица на измерванията; и кратък коментар за всяка аномалия. В легендата се разграничават регистриран температурен контраст, теренно потвърдено изтичане и участък, оставен за последващо обследване. Температурната скала, видът на използваното изображение и начинът на георефериране се посочват изрично. При публикуване на температура се описват настройките на радиометричната обработка и се запазва връзката към оригиналния кадър.

Възпроизводимостта може да се подобри чрез полеви протокол с постоянни графи: начало и край на полета, въздушна температура и влажност, облачност, вятър, водно ниво, настройки на термалната камера, време на наземните измервания и координати на контролните точки. При повторни кампании еднаквата структура на записите улеснява проверката дали промяната на аномалията се дължи на хидроложкия режим или на условията на снимане. Ако сезонните наблюдения дадат противоречиви сигнали, тълкуването се отлага до допълнителна теренна проверка.

Заключение

Предложената последователност обединява предварителен хидрогеоложки анализ, съгласувано термално и видимо заснемане, пространствено сравнение и непосредствена теренна проверка. Основният резултат от прилагането ѝ е карта на участъци с различна степен на обоснованост за последващо изследване. Надеждността на тълкуването зависи от температурния контраст, качеството на кадрите, съхранените метаданни и проверката на алтернативните причини за аномалиите. Методиката може да се адаптира към езера, реки и влажни зони според местните геоложки и хидроложки условия.

Литература:

1. Anderson, M. P. 2005. Heat as a ground water tracer. Ground Water, 43(6), 951–968. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
2. Benderev, A. 2022. Project “Most Important Karst Aquifer Springs” (MIKAS) and Bulgaria’s participation in it. Engineering Geology and Hydrogeology, 36, 45–57. https://doi.org/10.52321/igh.36.1.45
3. Chanev, M., B. Bonchev, D. Valcheva, L. Filchev. 2024. Using of UAV data for monitoring of organic einkorn. Proceedings of the 9th International Conference on Cartography & GIS, Bulgarian Cartographic Association, 154–163.
4. Chanev, M., N. Dolapchiev, I. Kamenova, L. Filchev. 2023. Application of remote sensing methods for monitoring wild life populations: a review. Proceedings of SPIE, 12786, 1278622. https://doi.org/10.1117/12.2681760
5. Ciocani, P., M. Chanev, P. Popov, I. Ivanov, L. Filchev. 2025. Spatial Technologies in Archeology: From GIS Mapping to SFM-Based Modelling. Proceedings of the Twenty-first International Scientific Conference Space, Ecology, Safety SES’2025, SRTI–BAS, 200–206.
6. Damyanova, E. 2021. Analysis of the condition of karst springs included in the National Groundwater Monitoring Network. Engineering Geology and Hydrogeology, 35, 31–39. https://doi.org/10.52321/igh.35.1.31
7. Deitchman, R. S., S. P. Loheide II. 2009. Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face. Geophysical Research Letters, 36, L14401. https://doi.org/10.1029/2009GL038103
8. DJI. 2026. Mavic 3 Enterprise Series Specifications. https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs (достъп: 25.09.2026).
9. Dugdale, S. J. 2022. Looking to the skies: Realising the combined potential of drones and thermal infrared imagery to advance hydrological process understanding in headwaters. Water Resources Research, 58, e2021WR031168. https://doi.org/10.1029/2021WR031168
10. Dugdale, S. J., C. A. Kelleher, I. A. Malcolm, S. Caldwell, D. M. Hannah. 2019. Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity. Hydrological Processes, 33(7), 1152–1163. https://doi.org/10.1002/hyp.13395

11. Gerginov, P. 2021. Geological and tectonic preconditions for hydraulic heterogeneity of the rocks in the area of the Gotse Delchev valley. Engineering Geology and Hydrogeology, 35, 51–61. https://doi.org/10.52321/igh.35.1.51
12. Gerginov, P., T. Orehova. 2010. Hydrogeological study of the Opitsvet-Dragovishtitsa karst basin. Engineering Geology and Hydrogeology, 25, 67–77
13. Kelly, J., N. Kljun, P.-O. Olsson, L. Mihai, B. Liljeblad, P. Weslien, L. Klemedtsson, L. Eklundh. 2019. Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera. Remote Sensing, 11(5), 567. https://doi.org/10.3390/rs11050567
14. Mundy, E., T. Gleeson, M. Roberts, M. Baraer, J. M. McKenzie. 2017. Thermal imagery of groundwater seeps: Possibilities and limitations. Groundwater, 55(2), 160–170. https://doi.org/10.1111/gwat.12451
15. Ozotta, O., P. J. Gerla. 2021. Mapping groundwater seepage in a fen using thermal imaging. Geosciences, 11(1), 29. https://doi.org/10.3390/geosciences11010029
16. Sanz-Ablanedo, E., J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez, C. Ordóñez. 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sensing, 10(10), 1606. https://doi.org/10.3390/rs10101606
17. Shopov, Y., K. Petkova, O. Ognianov. 2021. A new technique for remote location of unknown caves and deep-seated faults by unmanned aerial systems (UAS). Review of the Bulgarian Geological Society, 82(3), 225–227. https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2021.82.3.225
18. Vasileva, T. 2019. An assessment of potential groundwater recharge zones in Bulgaria. Geologica Balcanica, 48(1), 43–61. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.48.1.43
19. Vasileva, T., T. Orehova, K. Kroumova. 2017. Groundwater contribution to the river flow for the upper course of the Osam River based on two baseflow separation methods. Geologica Balcanica, 46(2), 73–82. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.46.2.73
20. Watts, C. L., C. E. Hatch, R. Wicks. 2023. Mapping groundwater discharge seeps by thermal UAS imaging on a wetland restoration site. Frontiers in Environmental Science, 10, 946565. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.946565

ИДЕНТИФИЦИРАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНОТО ДРЕНИРАНЕ НА ПОДЗЕМНИ ВОДИ ЧРЕЗ ТЕРМАЛНО ДИСТАНЦИОННО ОБСЛЕДВАНЕ С БЕЗПИЛОТНА ЛЕТАТЕЛНА СИСТЕМА – ПРИМЕР ОТ ВС „ИЗВОРА“, С. КРУПНИК

Борислав Борисов

Геологически институт „Страшимир Димитров“ – Българска академия на науките
e-mail: bobiborisov@abv.bg

Ключови думи: *подземни води; термално обследване; безпилотна летателна система; извор; Крупник*

Резюме: *В статията е разгледана възможността за локализиране на зони на дрениране на подземни води около водовземно съоръжение „Извора“, южно от с. Крупник. След преустановяване на експлоатацията изходящият тръбопровод е затапен. Впоследствие в прилежащия терен са наблюдавани просмуквания и деформации. През юни 2026 г. са извършени оптично и термално заснемане с безпилотна летателна система DJI Mavic 3 Thermal, геодезическо заснемане и теренни наблюдения. Температурните контрасти са съпоставени с видимите овлажнени участъци и водопроявления. Част от аномалиите съвпадат с установените на терен изтичания и насочват към възможни приповърхностни пътища на водата. Резултатите показват практическата стойност на термалните изображения при планиране на целеви проверки, но сами по себе си не определят произхода, дебита или дълбочината на подземния поток.*

IDENTIFICATION OF NATURAL GROUNDWATER DISCHARGE THROUGH UAV THERMAL REMOTE SENSING: A CASE STUDY OF THE IZVORA WATER INTAKE, KRUPNIK, BULGARIA

Borislav Borisov

Geological Institute “Strashimir Dimitrov” – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: bobiborisov@abv.bg

Keywords: *groundwater discharge; thermal imaging; unmanned aerial vehicle; spring; Krupnik*

Abstract: *This paper examines the use of unmanned aerial vehicle (UAV) thermal imaging to locate groundwater discharge near the Izvora spring water intake, south of Krupnik, Bulgaria. Following the cessation of operation, the outlet pipe was blocked. Seepage and ground deformation were subsequently observed nearby. In June 2026, optical and thermal UAV imaging with a DJI Mavic 3 Thermal was combined with geodetic surveying and field observations. Surface thermal contrasts were compared with visible wet areas and observed seepage. Several anomalies coincide with field-verified water emergence and indicate possible shallow drainage pathways. The results demonstrate the value of thermal imagery for targeting field inspection; thermal contrast alone cannot establish the origin, discharge rate, or depth of groundwater flow.*

Въведение

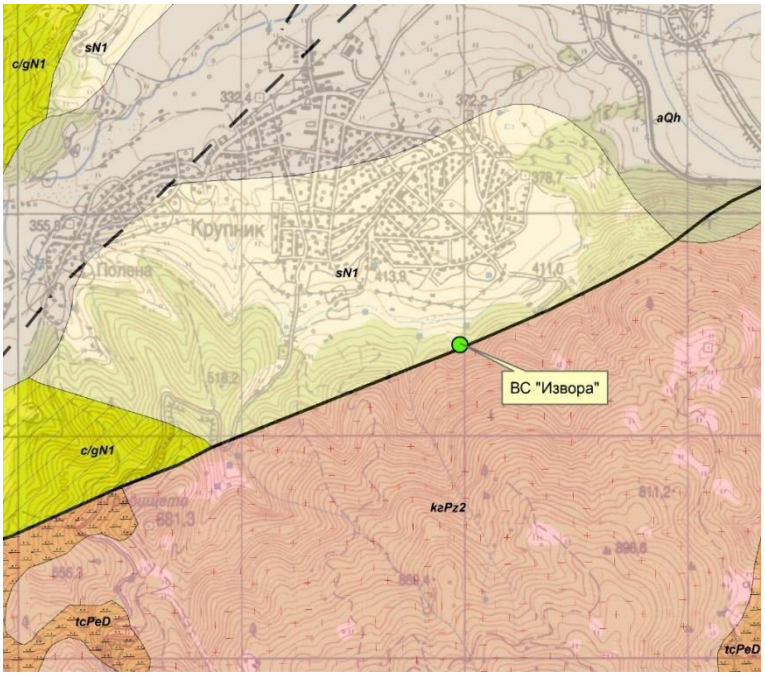
Изворите и зоните на просмукване са повърхностен израз на дренирането на подземните води. Тяхното установяване може да бъде затруднено от растителност, насипни материали и изградени каптажни съоръжения. Термалните изображения открояват локални температурни различия, които при подходящи условия се свързват с изтичане на подземни води (Deitchman & Loheide, 2009; Ozotta & Gerla, 2021). Изследвания с термални камери, монтирани на безпилотни летателни апарати (БЛА), показват възможност за пространствено картографиране на водопроявления и проследяване на повърхностния им израз (Watts et al., 2023).

Температурата на заснетата повърхност обаче зависи от слънчевата радиация, растителността, влажността, вида на материалите, а до голяма степен и от часа на наблюдението. Поради това термалната аномалия представлява признак за проверка, а не самостоятелно доказателство за подземен приток (Mundy et al., 2017).

Целта на изследването е да се очертаят вероятните участъци на дрениране около ВС „Извора“ чрез съвместна интерпретация на термални и оптични изображения, геодезически данни и теренни наблюдения.

Район на изследване и хидрогеоложки условия

Обектът е разположен приблизително на 300 m южно от с. Крупник, община Симитли, върху склон в периферията на Симитлийската котловина (фиг. 1).



Фиг. 1. Местоположение на ВС „Извора“ и обхват на изследвания район

Симитлийската котловина принадлежи към системата от неогенски грабени по долината на Струма. В нейното развитие важна роля имат активизирането на граничните разломи и натрупването на седименти (Nedjalkov et al., 1988). За района на Крупник са описани разнородни метаморфни и гранитоидни комплекси (Zagorchev et al., 2017). На разглеждания обект изворното проявление е свързано с контактната зона между скалната основа и седиментните образувания според наличните теренни и картни данни.

Разломните и контактните зони могат да създават предпочитани пътища на филтрация, но тяхната роля зависи от конкретната геометрия и пропускливостта на скалите (Gerginov, 2021). Положението на подземните пътища в участъка на ВС „Извора“ не може да бъде определено еднозначно само по повърхностните термални изображения.

Инженерногеоложкият контекст е съществен за интерпретацията на наблюдаваните деформации. В регионалното изследване на Dobrev (1997) са разгледани свлачищата в Симитлийската котловина, включително геоложките и хидрогеоложките условия и техногенните въздействия. Тази работа обосновава необходимостта водопроявленията да се разглеждат съвместно със склоновите процеси. Регионалната характеристика обаче не е достатъчна за класифициране на конкретното пропадане при каптажа. За това са необходими данни за строежа на насипа, състоянието на дренажа и развитието на деформацията във времето.

Състояние на съоръжението и наблюдавани процеси

Според предоставените сведения водите от извора са използвани за питейно-битово водоснабдяване до 2019 г. След установяване на превишени стойности на общата алфа-активност експлоатацията е преустановена. Тези обстоятелства са изходни данни за настоящото изследване, като стойностите на радиологичните показатели не са предмет на анализ.

Изходящият тръбопровод на водовземното съоръжение е затапен с цел да се предотврати използването на водата от местното население. В последствие в прилежащия терен са наблюдавани овлажняване, водопроявления и локални деформации.

Затапването е възможен фактор за промяна на местата на изтичане, но тази причинна връзка не може да се установи количествено без данни за предходния режим, конструкцията на каптажа и водните нива. Значението на водния режим за устойчивостта на склонове е показано в други инженерногеоложки обекти (Angelov & Vasileva, 2023); тези резултати не следва да се пренасят като пряко доказателство за процесите при ВС „Извора“. За района на Крупник са описани и регионални разломни и гравитационни движения (Avramova-Tacheva & Dobrev, 2007), които също не могат автоматично да се отъждествят с локалните деформации при съоръжението.

Материали и методи

През месец юни 2026 г. районът е заснет с оптичната и термалната камера на DJI Mavic 3 Thermal. Извършени са GNSS заснемане и теренен оглед на достъпните участъци. Оптичното заснемане е използвано за локализиране на каптажа, ревизионната шахта, насипа и видимите водопроявления. Термалните кадри са интерпретирани спрямо съседните повърхности и проверките на терен.

Приложението на БЛА с оптични и термални камери за наблюдение на инфраструктурни обекти е разгледано от Zhelev et al. (2026), които съчетават въздушното заснемане с радарни спътникови данни. При настоящото изследване оптичните и термалните изображения се използват за съпоставяне на състоянието на водовземното съоръжение с пространственото разположение на овлажнените участъци и водопроявленията.

Подходът съчетава пространствения обзор на заснемането с БЛА с непосредствена проверка на аномалиите. Подобно допълване между дистанционни и наземни данни е важно при интерпретация на характеристиките на повърхността (Filchev et al., 2025). При хидроложки приложения съчетаването на термални изображения и БЛА позволява да се изследват пространствени модели, които трудно се проследяват само от отделни наземни точки (Dugdale, 2022).

При съпоставянето на изображенията основни ориентири са неподвижните елементи на съоръжението и ясно различимите граници на теренните обекти. Интерпретацията се извършва последователно – установяване на локалния температурен контраст, проверка на вида на повърхността в оптичното изображение и съпоставяне с наблюдаваното овлажняване. Съседни участъци с подобно покритие са по-подходящи за сравнителен фон от повърхности с различен материал или различно ослънчаване. Пространственото съвпадение се оценява на равнището на разпознаваемите обекти, без да се приписва точност, която не е проверена независимо.

Съчетаването на ГИС, изображения от БЛА и фотограметрични модели за пространствено документиране на обекти е разгледано и в археологически изследвания (Ciocani et al., 2025). При ВС „Извора“ съвместното разглеждане на изображенията и геодезическите данни подпомага определянето на взаимното положение на съоръжението, водопроявленията и наблюдаваните деформации.

Анализът в настоящата работа е качествен. Представеният набор данни не включва синхронни измервания на температурата и дебита на изтичащата вода, както и количествена оценка на неопределеността на термалните измервания. Поради това температурните контрасти се използват като пространствени индикатори, без да се изчислява дебит или да се определя дълбочината на източника.

Резултати и обсъждане

В термалните изображения се открояват участъци с различна температура спрямо прилежащия терен около ВС „Извора“ и по склона под него. Съпоставката с теренните данни показва, че част от тези участъци съвпадат с наблюдавани изтичания и овлажняване. При подобни изследвания водните проявления могат да се открояват поради различния топлинен режим на изтичащата вода и заобикалящата повърхност (Deitchman & Loheide, 2009; Ozotta & Gerla, 2021).

Съвместното разглеждане на ортофотото и термалното изображение уточнява разположението на температурните контрасти спрямо каптажа, ревизионната шахта, насипа и установените деформации (фиг. 2 и 3). Подобен подход за пространствено картографиране на просмуквания с термални данни от БЛА е приложен и при други теренни условия (Watts et al., 2023).



Фиг. 2. Деформация на терена над дренажа: 1 – ревизионна шахта; 2 и 3 – водопроявления

Най-убедителни са аномалиите, за които има пряко съвпадение с водопроявление, установено при огледа. Останалите аномалии остават вероятни зони и изискват повторна теренна проверка. Това разграничение е съществено, тъй като температурният сигнал може да бъде повлиян от различия в покритието и микроклимата (Mundy et al., 2017).

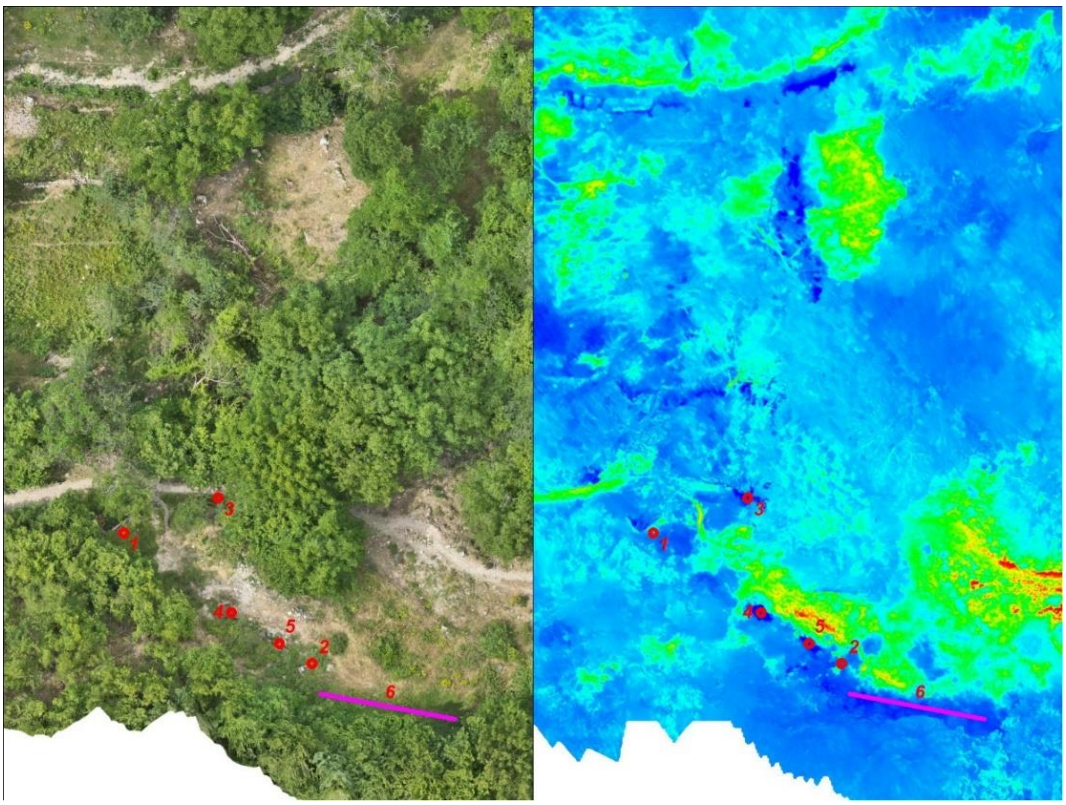
За работната интерпретация се разграничават три групи участъци: водопроявления, потвърдени при огледа и разпознаваеми в изображенията; овлажнени участъци без ясно изразено свободно изтичане; и температурни аномалии без наземно потвърждение. Първата група дава най-надеждна основа за локализиране на дренирането. Втората може да отразява дифузно просмукване или задържане на влага, а третата служи за насочване на допълнителни проверки. Така картографираните признаци не се приравняват автоматично на отделни извори.

Разположението на водопроявленията е съвместимо с хипотезата за преразпределение на изтичането след прекъсване на организираното отвеждане на водата. Публикуваните данни за структурния строеж на района (Nedjalkov et al., 1988; Zagorchev et al., 2017) и за значението на контактните зони в сходни хидрогеоложки обстановки (Gerginov, 2021) дават геоложка рамка на тази интерпретация, но не установяват конкретния подземен път под каптажа.

Наличието на преовлажняване може да влияе върху локалната устойчивост на приповърхностните материали (Angelov and Vasileva, 2023). Установяването на механизма на деформациите при ВС „Извора“ изисква самостоятелно инженерногеоложко изследване. Регионалните наблюдения върху Крупнишкия разлом и свързаните склонови движения (Avramova-Tacheva & Dobrev, 2007) са контекст, а не доказателство за причината на конкретното пропадане.

При оценка на възможните причини трябва да се отчита и валежният режим. Ivanov & Ivanova (2023) разглеждат влиянието на валежите върху свлачищната активност в Югозападна България и показват необходимостта от съвместен анализ на климатични и теренни фактори. За ВС „Извора“ липсата на съпоставим времеви ред не позволява да се отдели ефектът на затапването от промени в подхранването и повърхностния отток. Повторните обследвания следва да се съпровождат с данни за предходните валежи и със снимки на едни и същи контролни участъци.

Термалното обследване е най-полезно като способ за избор на места за проверка. То показва пространствения модел на температурните разлики, докато теренните наблюдения установяват дали има действително изтичане. Денонощните изменения и разнородните повърхности могат да създават погрешни интерпретации (Mundy et al., 2017), а съчетаването на БЛА и термални данни изисква внимание към условията на заснемане (Dugdale, 2022).



Фиг. 3. Ортофото и термално изображение на района: 1 – каптаж на ВС „Извора“; 2 – ревизионна шахта; 3 и 4 – водопроявления; 5 – просмукване през насипа; 6 – зона с възможно наличие на вода

Перспективи за проверка на концептуалния модел

Работният модел допуска, че ограниченото отвеждане през съоръжението може да насочи част от водата към по-пропускливи приповърхностни участъци и към насипа. Проверка на този модел изисква установяване на конструктивната схема, достъпните дренажни връзки и действителните водни нива. При възможност трябва да се измерят отделно температурата и дебитът на видимите изтичания и да се сравнят с водата в съоръжението. Сходството на температурите би подкрепило, но не би доказало самостоятелно общ произход.

Полезна следваща стъпка е повторно термално заснемане при различно ослънчаване и устойчиво обозначени контролни точки. Участъци, които запазват връзката си с проверено изтичане, имат по-голяма диагностична стойност от единични аномалии. За деформирания терен геодезическото проследяване трябва да се съчетае с инженерногеоложки оглед. Решенията за възстановяване или промяна на дренажа следва да се основават на тези допълнителни данни, а термалната карта да служи за избор на места за измерване и наблюдение.

Заключение

Термалното обследване с БЛА откри температурни аномалии около ВС „Извора“, част от които съвпадат с проверени на терен водопроявления. Тези съвпадения позволяват да се очертаят приоритетни участъци за последващи измервания.

Комбинираният анализ на термални и оптични изображения и наземни данни подпомага локализирането на повърхностните изтичания. Само по термалното изображение не може да се определи нито дебитът, нито действителната геометрия на подземните филтрационни пътища.

За проверка на предполагаемата връзка между затапването, преразпределението на потока и деформациите са необходими данни за конструкцията на съоръжението, водните нива, температурата и дебита на водопроявленията, както и повторни наблюдения при различни условия.

Литература:

1. Angelov, L., T. Vasileva 2023. Influence of geological and hydrogeological settings in assessing the stability of a landslide slope in the Tutrakan area, Northeastern Bulgaria. Engineering Geology and Hydrogeology, 37, 47–60. https://doi.org/10.52321/igh.37.1.47.
2. Avramova-Tacheva, E., N. Dobrev 2007. On the application of 3D monitoring methods of active fault and gravitational movements in Bulgaria. Geologica Balcanica, 36(3–4), 13–20. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.36.3-4.13.
3. Ciocani, P., M. Chanev, P. Popov, I. Ivanov, L. Filchev. 2025. Spatial Technologies in Archeology: From GIS Mapping to SFM-Based Modelling. Proceedings of the Twenty-first International Scientific Conference Space, Ecology, Safety SES'2025, SRTI–BAS, 200–206.
4. Deitchman, R. S., S. P. Loheide II. 2009. Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face. Geophysical Research Letters, 36, L14401. https://doi.org/10.1029/2009GL038103.
5. Dobrev, N. 1997. Landslides in the Simitli Kettle. Engineering Geology and Hydrogeology, 24, 41–65 (in Bulgarian with English abstract).
6. Dugdale, S. J. 2022. Looking to the Skies: Realising the Combined Potential of Drones and Thermal Infrared Imagery to Advance Hydrological Process Understanding in Headwaters. Water Resources Research, 58, e2021WR031168. https://doi.org/10.1029/2021WR031168.
7. Filchev, L., M. Chanev, G. Petrov 2025. Earth Observation for Comprehensive Soil Health Assessment and Monitoring. Revue Internationale de Géomatique, 34, 513–533. https://doi.org/10.32604/rig.2025.064280.
8. Gerginov, P. 2021. Geological and tectonic preconditions for hydraulic heterogeneity of the rocks in the area of the Gotse Delchev valley. Engineering Geology and Hydrogeology, 35, 51–61. https://doi.org/10.52321/igh.35.1.51.
9. Ivanov, I., E. Ivanova 2023. Influence of precipitation on landslide activity in Southwestern Bulgaria in the context of climate change. Engineering Geology and Hydrogeology, 37, 133–144. https://doi.org/10.52321/igh.37.1.133.
10. Mundy, E., T. Gleeson, M. Roberts, M. Baraer, J. M. McKenzie 2017. Thermal Imagery of Groundwater Seeps: Possibilities and Limitations. Groundwater, 55(2), 160–170. https://doi.org/10.1111/gwat.12451.
11. Nedjalkov, P., E. Kojumdgieva, I. Božkov 1988. Sedimentation cycles in the Neogene grabens along the Struma valley. Geologica Balcanica, 18(2), 61–66.
12. Ozotta, O., P. J. Gerla 2021. Mapping Groundwater Seepage in a Fen Using Thermal Imaging. Geosciences, 11(1), 29. https://doi.org/10.3390/geosciences11010029.
13. Watts, C. L., C. E. Hatch, R. Wicks 2023. Mapping groundwater discharge seeps by thermal UAS imaging on a wetland restoration site. Frontiers in Environmental Science, 10, 946565. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.946565.
14. Zagorchev, I., C. Balica, E. Kozhoukharova, I. Balintoni 2017. Pirin metamorphic and igneous evolution revisited in a geochronological frame based on U-Pb zircon studies. Geologica Balcanica, 46(1), 27–63. https://doi.org/10.52321/GeolBalc.46.1.27.
15. Zhelev, G., N. Dimitrov, Z. Dimitrov, G. Sotirov, P. Penev, K. Metodiev, R. Dimitrov, M. Chanev. 2026. Quasi-Synchronous Aerospace Monitoring of Critical Infrastructure Objects Using Unmanned Aerial Vehicles and Radar Satellites. Aerospace Research in Bulgaria, 38, 167–178. https://doi.org/10.3897/arb.v38.e15.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МЪТНОСТ НА ВОДАТА В ЯЗОВИР „ПЧЕЛИНА“ ПО ДАННИ ОТ САТЕЛИТНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТ SENTINEL-2 И LANDSAT 9

Христо Николов, Мартина Димитрова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: hristo@stil.bas.bg, martina.dimitrova@space.bas.bg

Ключови думи: *Дистанционни наблюдения на Земята, Sentinel-2, Landsat 9, NDTI, Acolite*

Резюме: *В настоящата работа е разгледана възможността за определяне на мътността на водата в язовир „Пчелина“ по данни от сателитите Sentinel-2 и Landsat 9. За постигане на поставената цел са използвани сателитни изображения ниво на обработка L1. Атмосферната корекция е направена със софтуер ACOLITE. Върху основа на атмосферно коригираните данни е изчислен нормализиран индекс за мътност NDTI. Сравнени са стойностите на NDTI в пикселите от изображенията на Sentinel-2 и Landsat 9. Изчислена е водната площ, върху която се прилага индексът.*

DETERMINATION OF WATER TURBIDITY IN PCHELINA RESERVOIR USING SENTINEL-2 AND LANDSAT 9 SATELLITE IMAGERY DATA

Hristo Nikolov, Martina Dimitrova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: hristo@stil.bas.bg, martina.dimitrova@space.bas.bg,

Keywords: *remote sensing, Sentinel-2, Landsat 9, NDTI, Acolite*

Abstract: *The study is focused on the possibility of determining water turbidity in the Pchelina reservoir using data from Sentinel-2 and Landsat 9. In order to achieve the set objective satellite images processed to level 1 were used. The atmospheric correction was performed using ACOLITE software. The Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) was applied to the atmospherically corrected data. NDTI values from Sentinel-2 and Landsat 9 pixels were compared. The water area of index application was calculated.*

Въведение

Обект на изследване

Язовир Пчелина е разположен на р. Струма на 619 m надм. в. Намира се в Югозападна България, Област Перник, община Ковачевци, най-близкото населено място е село Лобош. Около язовира са разположени землищата и на селата Ковачевци, Радибош и Пробой. Към 2026 г. водния обект е собственост на Министерство на земеделието и храните. [1] По проект обемът на язовира е 54.8 x 10^6 m^3. Мъртвият обем е 34 x 10^6 m^3, а полезният - 20.6 x 10^6 m^3. Максималната площ е 538 ha, а максималната дълбочина - 19 m. [2] Язовирът е въведен в експлоатация през 1974 г. Неговата основна функция е да послужи за утаяване на суспендираните вещества, които са постъпили в р. Струма от промишлените предприятия на Перник и Радомир. [2] От 2015 г. е пуснат в експлоатация МВЕЦ „Пчелина“. Водите на язовира се използват и за селскостопанско напояване.

Язовир „Пчелина“ е включен в Националната система за мониторинг на околната среда и попада в списъка на 52-та комплексни и значими язовира, управлявани и следени от Министерството на околната среда и водите. [3]

Най-често мътността на водата се определя от количеството разтворени органични и неорганични вещества в нея, както и наличието на живи организми като например фитопланктон. Според дефиницията на ASTM International, мътността е израз на оптичните

свойства на дадена течност, които водят до процеси на разсейване и поглъщане на попадналата електромагнитна енергия от оптичния диапазон, вместо да преминават през пробата по права линия.[4] Основна причина за повишаване на мътността са постъпващите седименти носени от речното течение, които вследствие процесите на отлагане се задържат в язовирната чаша. Следва да се отбележи, че освен седименти, постъпващата във водното тяло водна маса може да внесе и биогенни елементи (напр. азот, фосфор) в следствие на дифузно или точково замърсяване. Така се стига до ускоряване на еутрофизацията. В резултат възникват цъфтежи на фитопланктона и свързаните с тях неблагоприятни ефекти за всички останали групи водни организми – намалено количество светлина, проникваща в дълбочина, гниене и изчерпване на кислорода. Може да се стигне до измиране на рибите и другите водни организми от задушаване. [5]

Докладът на Съвместния изследователски център[1] [6] за прилагане на подход, прилагащ данни от дистанционни изследвания (ДИ) на Земята в подкрепа на Рамкова директива за водите (РДВ), разглежда актуалното състояние за приложението им при извършване на мониторинг и оценка на екологичното състояние на повърхностни води в Европа. Според проучването, данните от ДИ понастоящем не се използват в повечето държави-членки, въпреки че има добри резултати в подкрепа на използването им. Съществуват разработени приложения (във Финландия, Швеция, Белгия), които предоставят данни от ДИ, които се използват като за получаване на оперативна информация чрез правилото за „експертна оценка“ или чрез моделиране. Според проучването от доклада [6], в повечето държави-членки от ЕС има желание за използване от ДИ за РДВ. Ползите от използването на данните от ДИ са, че може да се постигне по-добро пространствено и времево покритие на мониторинга относно състоянието на обекта, като също така следва да се отбележи, че са по-изгодни от икономическа гледна точка.

Данни и метод

Настоящото изследване на яз. „Пчелина“, има за цел да допринесе за подобряване качеството на оперативния мониторинг на водни тела, използвайки на данни от ДИ на Земята. В рамките на този процес като основен източник на данни са използвани многоканални данни от сателитните спектрометрични апаратурни комплекси, работещи в оптичния диапазон на електромагнитния спектър, разположени на борда на Sentinel 2 и Landsat 9. Данните от двете сателитни мисии се предоставят под формата на безплатни изображения със свободен достъп, но при условие да бъдат цитиран техният произход.

Сателитни данни

За постигане целите на конкретното изследване бяха използвани два набора сателитни данни – от мисиите Sentinel 2 и Landsat 9. В този случай данните бяха и от една и съща дата – 17 април 2026 г., което доведе до повишаване на достоверността на резултатите, тъй като може да се допусне, че състоянието на атмосферата и на изследвания обект при двете регистрации е било сходно. Това дава основание резултатите от обработката на двата набора данни да се сравняват директно. Основание за това дава и фактът, че двете мисии преминават в рамките интервал от 1 час, което не променя съществено количеството енергия, попадащо върху изследвания обект, както и намалява появата на сенки върху него.

Sentinel-2 е сателитна мисия на Европейския съюз и е изведена в орбита в рамките на програма „Коперник“, която има за задача да предоставя многоканални данни от оптичния, близкия инфрачервен и късовълновия инфрачервен диапазони на електромагнитния спектър. В момента тя се състои от три сателита A, B и C, като всички се движат по една и съща слънчево-синхронна орбита (786 km). Фазовото отместване на основната двойка B и C е 180^{o}, а третият A е на 36^{o} от B. Това позволява да се постигне максимална времева разделителна способност от 5 дни за изследваните площи на екваториални ширини, докато за средни ширини да намалява до 2-3 дни. Всеки един сателитите е оборудван със сензор MSI (Multi Spectral Imager), който има 13 спектрални канала. Следва да се има предвид, че тяхната пространствената разделителна способност (ПРС) е различна 10, 20 и 60 m, което налага прилагане на процедура по тяхната пространствена трансформация за нуждите на конкретна задача, ако се използват канали от различна ПРС.

Данните от Sentinel-2 MSI обработени до ниво L1C бяха изтеглени от основното хранилище за данни по програма „Коперник“ (https://browser.dataspace.copernicus.eu/). Продуктът L1C се състои от единични сцени с площ 100 km², предоставяни в проекция UTM/WGS84. Радиометричните измервания за всеки пиксел са представени като стойности на отражателната способност на подстилащата повърхност на „горна граница на атмосферата“ (TOA). [7] Конкретно за това изследване изображенията от Sentinel-2 са от 17 април 2026 г.

[1] Joint Research Center

Сателитът Landsat 9 (L9) е мисия на Геоложката служба на САЩ изведен в слънчево-синхронна орбита (705 km) на 21 септември 2021 г. Той разполага с два сензора – OLI-2 (Operational Land Imager) 9 канала в оптичния диапазон и TIRS-2 (Thermal Infrared Sensor) два канала в термалния диапазон, които са почти идентични с тези на предшестващия го Landsat 8. В оптичния диапазон пространствената разделителна способност на каналите е 30 m, като изключение преви панхроматичния канал, при който тя е 15 m. Предимството на OLI-2 е подобрената радиометрична разделителна способност за сензора– 14 битова/пиксел спрямо 12 битова/пиксел при OLI. Това позволява да се регистрират по-малки разлики в отражателната способност на обектите за конкретен спектрален канал, особено при обекти, които в изображенията са по-тъмни като например водни басейни или тропически гори. Времевата разделителна способност (периода на повторно преминаване) на L9 е 16 дни, а при съвместно използване с L8 се свежда до 8 дни. [8, 9] Данните от L9 са получени от платформата Earth Explorer на Геоложката служба на САЩ (USGS) за 17 април 2026 г., ниво на обработка L1. [10]

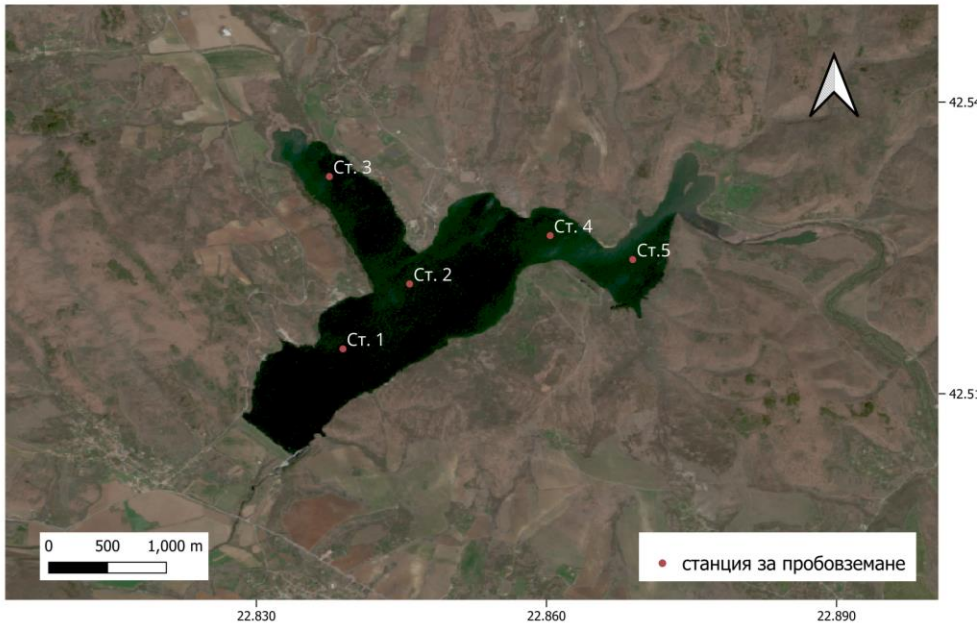
Атмосферна корекция

Използваните за получаване на крайните резултати изображения са във формат от ниво С1 без приложена атмосферна корекция. Причината да се започне оттам е, че продуктите от ниво L2 прилагани от доставчиците на данни стандартно прилагат подходи ориентирани към обекти от сушата и не отразяват спецификите на водни обекти. Поради тази те бяха обработени до ниво L2 със софтуерния продукт ACOLITE, който позволява избор на алгоритми за атмосферна корекция. Той е разработен от Кралския белгийски институт за природни науки (RBINS) и е ориентиран към анализ на водни обекти въз основа на сателитни данни от сателити като Landsat (5/7/8/9), Sentinel-2 (A/B/C), Pléiades и PlanetScope. ACOLITE е особено подходящ за обработка на данни за мътни води и малки вътрешноконтинентални водни басейни, но може да се използва и за по-бистри води, както и за земната повърхност. Последната версия на продукта предоставя възможност за обработка на данни от сензори с висока ПРС от порядъка на метър и по-висока (като напр. Pléiades, WorldView и PlanetScope). [11]

В рамките на проведеното изследване бяха подбрани и обработвани изображения от една и съща дата – 17.04.2026 г. Пролетния период от годината предоставя благоприятни условия за регистрация на многоканални данни, тъй като през него се очаква да има по-малко облачна покривка в сравнение със зимния период. И двата използвани набори данни са под формата на изображения обработени от производителя до ниво С1 – без атмосферна корекция. Първа стъпка в проведената обработка беше да се приложи атмосферна корекция посредством програмния продукт ACOLITE, който предоставя по-надеждни резултати за стоящи водни обекти. Следващия етап от обработката е проведен в ГИС среда. От атмосферно коригираните изображения е изчислен диференциалният нормализиран индекс за мътност на водата. На фигура 1 върху растерна подложка създадена от RGB каналите на Sentinel-2 е показан формираният векторен точков слой, който съответства на примерни станции за пробовземане, съобразени с особеностите на конкретното водно тяло и осигуряващи статистически представителни резултати относно състоянието на пропускливостта на цялата площ на обекта.

От получените атмосферно коригирани изображения по формула (1), в която R е коефициентът на спектрално отражение в съответния спектрален диапазон на MSI или OLI-2, е изчислен нормализираният разликов индекс за мътност на водата NDTI (Normalized Difference Turbidity Index). Той използва нормализираната разлика на червения и зеления канали на сензора. Този индекс се базира на факта, че коефициентът на отражение на бистрата вода е по-висок в зелената област на спектъра, отколкото в червената. По-високата степен на мътност води до по-висока стойност на NDTI и обратно. Стойностите на индекса NDTI могат да са в диапазона от -1 до 1. [12]

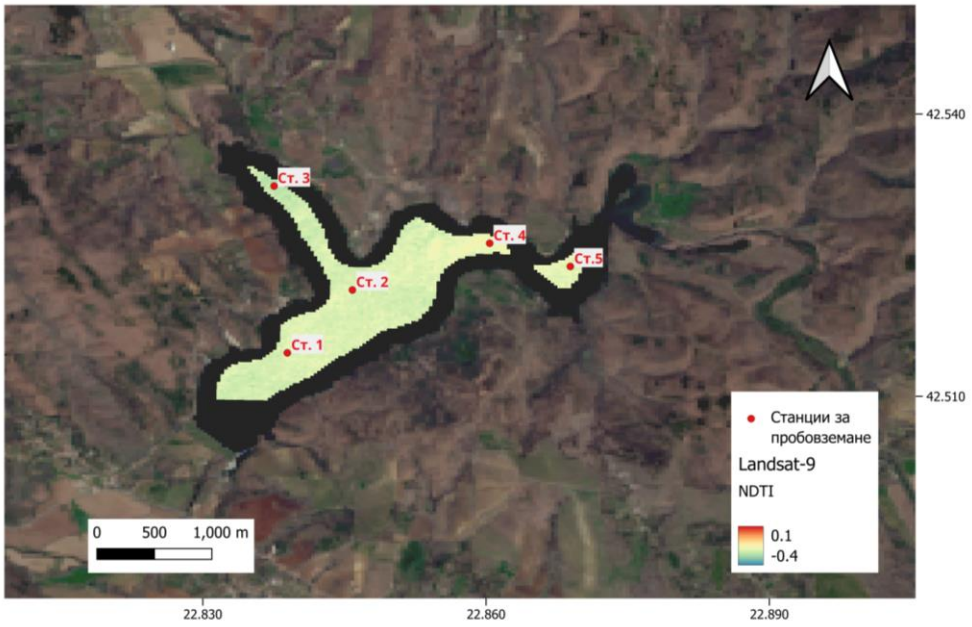
(1) $$\mathrm{NDTI} = \frac{R_{\mathrm{red}} - R_{\mathrm{green}}}{R_{\mathrm{red}} + R_{\mathrm{green}}}$$



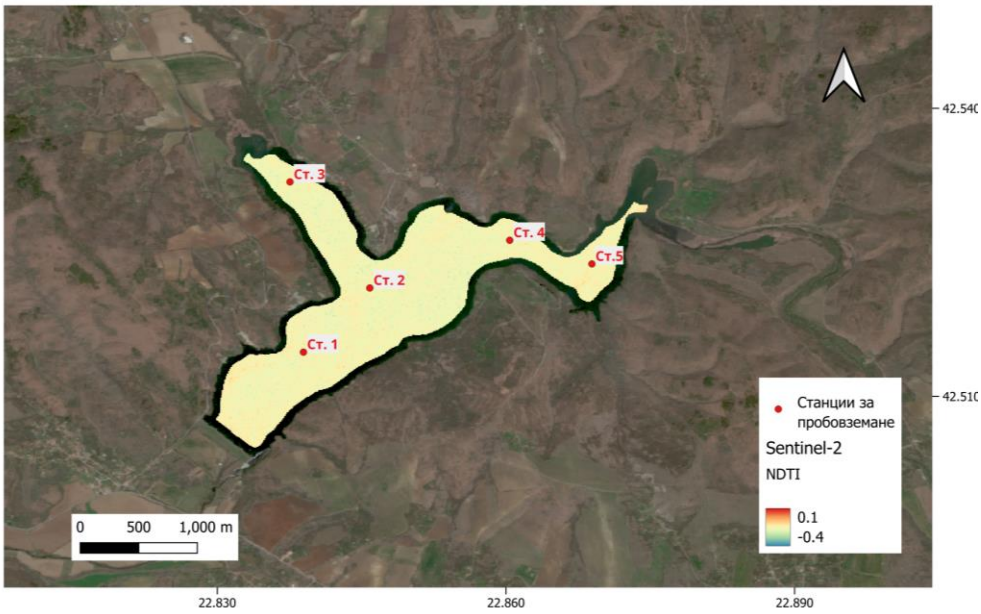
Фиг. 1. Изображение в естествени цветове на язовир „Пчелина“ по данни от Sentinel-2

Резултати

В настоящото изследване за тематичната обработка на данните и изчисляване на стойностите на индекса NDTI е използван ГИС софтуер с отворен код QGIS. Изчислените стойности на NDTI в това изследване и от двата сензора са в интервала от -0.4 до 0.1, като по-ниските стойности на индекса съответстват на водни площи с по-ниска мътност, докато по-високите означават по-висока такава. Получените карти на водното огледало и съответно мътността му са показани на фигури 2 и 3. Както се вижда на фигурите площите заети с вода са различни, което се дължи на различната ПРС на двата сензора и съответно пикселите по контура на обекта не предоставят надеждна информация относно мътността на водата. Тъй като ПРС на данните от L9 е по-ниска при обработката се формира контур на границата вода-суша, който е по-широк от този при

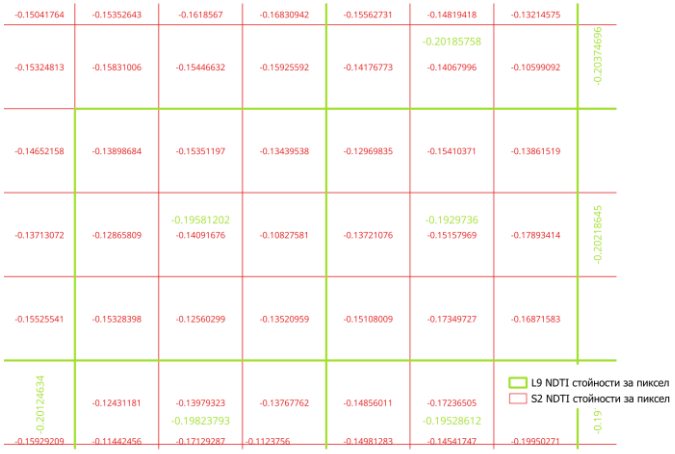


Фиг. 2. Изчислен NDTI индекс от Landsat-9 изображение на язовир „Пчелина“



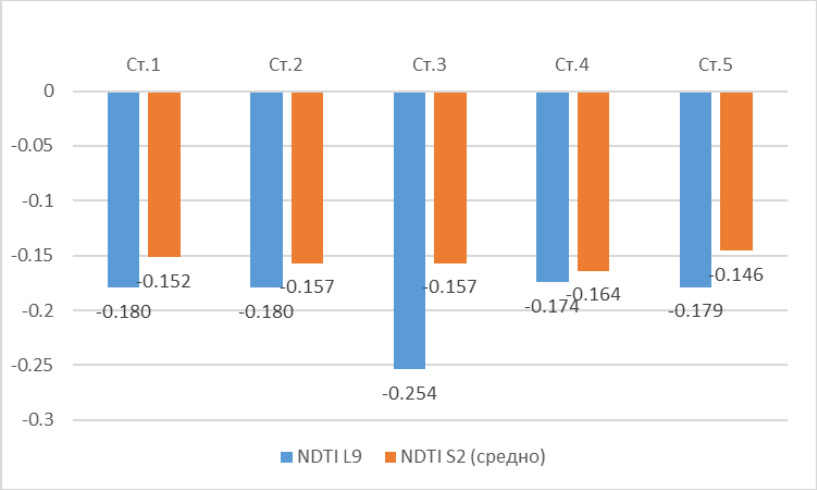
Фиг. 3. Изчислен NDTI индекс от Sentinel-2 изображение на язовир „Пчелина“

За да се проведе количествен анализ и допълнителна интерпретация на стойностите в двете изображения се наложи прехвърляне на NTDI стойностите в текстов формат. За тази цел от двете растерни изображения, съдържащи стойности на NDTI от двата източника бяха създадени векторни точкови слоеве, с чиято помощ бяха извлечени самите стойности на индекса. Както се вижда на фигура 4 площта на единичен пиксел от Landsat 9 изображението съответства на 9 пиксела от Sentinel 2 изображение, което е причина стойностите да не съвпадат напълно. Това наложи впоследствие усредняване на данните от Sentinel-2 изображението в рамките на единичен пиксел от Landsat 9 изображението и едва тогава те да се сравняват. Получените резултати показаха, че като цяло по-ниски стойности са изчислени за всички точки от Landsat 9 изображението, което най-вероятно се дължи на различната радиометрична разделителна способност на двата сензора.



Фиг. 4. Представяне на стойностните на NDTI индекса в пикселите на Landsat-9 и Sentinel-2

Пример за тези стойности е показан на фиг. 5, която показва изчислените стойности в избраните за пробовземане точки. По-ниската стойност за станция 3 от изображението на Landsat е възможно да се дължи на нейното местоположение – в по-плитката и тясна част в ръкава на река Светля.



Фиг. 5. Сравнение на стойности на NDTI индекс за пикселите на Landsat 9 и Sentinel 2 в съответните станции на пробовземане. Стойностите на индекса от изображение на Sentinel 2 са средно аритметично от 9 пиксела, съответстващи на 1 пиксел от Landsat 9.

Заключение

За да се приемат за надеждни резултатите е необходима валидация на резултатите получени от сателитните данни с данни от проведени теренни измервания, което ще позволи създаване на модел привързващ изчисленият индекс NDTI с измерена на място прозрачност на водата. Следва да се отбележи, че данните с по-ниска пространствена разделителна способност от Landsat 9 не дават достатъчна информация за зоните близки до границата вода-суша. Затова по-високата пространствена разделителна способност на Sentinel-2 изображенията позволява изследване на по-голяма площ от водното тяло. Приложената методика за изчисляване на индекси от двата източника на данни е приложима и при оценка на хлорофилно съдържание за водни площи.

Благодарности

Това изследване е направено по обучителната докторантска програма на секция „Системи за дистанционни изследвания“ към ИКИТ-БАН.

Литература:

1. Държавна агенция за метрологичен и технически надзор - https://dams.damtn.government.bg/index.php?option=com_webregister&view=item&Itemid=126&formdata[id]=552 линкът е активен към 31.08.2026 г.
2. Кожухаров, Д. 1994. Анализ на качествения състав на зоопланктона в системата р. Струма – яз. „Пчелина“ през 1990–1992 г.
3. Министерство на околната среда и водите – https://www.moew.government.bg/bg/vodi/povurhnostni-vodi/kompleksni-i-znachimi-yazoviri/
4. Dewantoro M. D. R. et al., 2024 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1343 012027.
5. Кожухаров, Д. 2019. Лимнология, с. 253.
6. Attila, J., et al., Use of Earth observation tools in support of the WFD – State of play for ecological status monitoring and assessment in surface waters of Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, https://data.europa.eu/doi/10.2760/3790150, JRC142686
7. European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook; ESA Standard Document; ESA: Paris, France, 2015.
8. The Landsat 9 (L9) Data Users Handbook; U.S. Geological Survey (USGS) and National Aeronautics and Space Administration (NASA); LSDS-2082, Version 1.0, February 2022.
9. U.S. Geological Survey (USGS) – https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9
10. U.S. Geological Survey (USGS) Earth Explorer – https://earthexplorer.usgs.gov
11. ACOLITE User Manual (QV – April 21, 2026), (c) RBINS 2014-2026
12. European Space Agency – https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/13.0.0/snap-toolboxes/eu.esa.opt.opttbx.radiometric.indices.ui/ndti/NdtiAlgorithmSpecification.html

INTEGRATING MULTISPECTRAL, THERMAL AND RGB UAV IMAGERY FOR THE DOCUMENTATION AND PROTECTION OF THE ARCHAEOLOGICAL SITE OF STAROSELTSI-KALETO

Petru Ciocani[1], Milen Chanev[1], Alexander Gikov[1], Ilina Kamenova[1], Pavel Popov[2], Lachezar Filchev[1]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Regional Historical Museum – Pleven
e-mail: p.ciocani@space.bas.bg

Keywords: *UAV-based remote sensing, multisensor photogrammetry, non-destructive investigation, cultural heritage protection*

Abstract: *This study shows the potential of multisensor UAV-based remote sensing for the assessment and preliminary investigation of endangered archaeological sites. The Kaleto fortress near Staroseltsi is a neglected archaeological site, which has long been affected by looting and, to a lesser extent, by erosion. RGB, multispectral, and thermal imagery acquired using UAV platforms were integrated to investigate and characterize its features photogrammetrically. The results revealed the fortress perimeter, a possible internal building, and two external earthworks potentially associated with the site's defensive system. Although all three data types contributed to the identification of these features, the multispectral products enhanced the visibility of the external linear defensive feature, whereas the thermal map provided a clearer representation of the U-shaped earthwork east of the fortress. The investigation also identified recent treasure-hunting pits, indicating continued illicit disturbance of the site. The results demonstrate the complementary value of RGB, multispectral, and thermal data for archaeological remote prospection and provide a baseline to support future monitoring and heritage protection.*

ИНТЕГРИРАНЕ НА МУЛТИСПЕКТРАЛНИ, ТЕРМАЛНИ И RGB ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТ БЛА ЗА ДОКУМЕНТИРАНЕ И ОПАЗВАНЕ НА АРХЕОЛОГИЧЕСКИЯ ОБЕКТ СТАРОСЕЛЦИ-КАЛЕТО

Петру Чокани[1], Милен Чанев[1], Александър Гиков[1], Илина Каменова[1], Павел Попов[2], Лъчезар Филчев[1]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Регионален исторически музей – Плевен
e-mail: p.ciocani@space.bas.bg

Ключови думи: *дистанционни изследвания с БЛА, мултисензорна фотограметрия, недеструктивно изследване, опазване на културното наследство*

Резюме: *Настоящото изследване показва потенциала на мултисензорното дистанционно изследване с БЛА за оценка и предварително проучване на застрашени археологически обекти. Крепостта Калето край Староселци е един пренебрегнат археологически обект, който отдавна е подложен на иманярска дейност, и в известна степен на ерозионни процеси. RGB, мултиспектрални и термални изображения, придобити с помощта на БЛА, са интегрирани за фотограметричното изследване и характеризиране на археологическите структури. Получените резултати позволяват да се разграничат очертанията на крепостта, една вероятна вътрешна постройка и две външни землени структури, които е възможно да са свързани с отбранителната система на обекта. Въпреки че и трите типа данни допринасят за идентифицирането на тези структури, мултиспектралните продукти осигуряват една по-добра визуализация на външната линейна отбранителна структура, докато термалната карта позволява по-ясното разграничаване на U-образното землено съоръжение, разположено източно от крепостта. В рамките на изследването са установени и скорошни иманярски изкопи, свидетелстващи за продължаващо незаконно разрушаване на археологическия обект. Получените резултати демонстрират взаимнодопълващия се потенциал на RGB, мултиспектралните и термалните данни при дистанционно археологическо изследване и осигуряват база за бъдещ мониторинг и опазване на културното наследство.*

Introduction

The application of unmanned aerial vehicles (UAVs) in archaeological research began to emerge in the early 2000s, offering new possibilities for the documentation, mapping, and investigation of archaeological sites [1; 2; 3]. Initially used primarily for aerial photography and site documentation, UAVs became increasingly accessible during the 2010s owing to advances in platform design, sensor technology, and photogrammetric processing software. The integration of structure-from-motion (SfM) photogrammetry enabled the efficient generation of high-resolution orthophotos, digital elevation models, and three-dimensional reconstructions, significantly enhancing the spatial documentation and interpretation of archaeological landscapes. Furthermore, the flexibility of UAV-based surveys allowed researchers to acquire detailed spatial data at relatively low cost and with greater temporal and spatial resolution than many conventional aerial survey methods [4, 5].

By the mid-2010s, the integration of multispectral and thermal sensors had expanded UAV applications in archaeology beyond conventional visual documentation, offering new opportunities to detect archaeological features that are not readily discernible to the human eye [6, 7]. The ability to acquire data across multiple spectral regions enabled researchers to identify and investigate archaeological features based on their distinctive spectral and thermal signatures. These developments strengthened the role of UAV-based remote sensing in archaeological investigation, particularly in surveying extensive areas where systematic geophysical prospection may be prohibitively costly, as well as for investigating sites where dense vegetation restricts accessibility and limits the effectiveness of conventional prospection methods [8, 9].

Multispectral and thermal imagery provide complementary approaches to detecting subtle variations in vegetation and soil properties that may indicate the presence of buried archaeological remains. Their combined application enables the assessment of differences in spectral reflectance and surface temperature associated with vegetation vigour, soil moisture, and subsurface conditions, thereby enhancing the detection and spatial delineation of archaeological features [10–12].

In alignment with the conference's thematic framework, particularly the dimension of "Safety", the present study broadens its scope to encompass the safeguarding and long-term preservation of cultural heritage. The present study addresses the Kaleto archaeological site, which is currently in a state of severe neglect, has sustained partial damage, and remains at risk of further destruction. To address these challenges, the study employs a state-of-the-art, non-destructive remote sensing approach, combining RGB-derived photogrammetric products, multispectral imagery, and thermal data. This multisensor methodology aims to document the site's current condition, identify and spatially delineate as many archaeological features as possible, and raise awareness of its archaeological significance. Furthermore, the resulting datasets provide a basis for future site monitoring and condition assessment with the goal of protecting the site against further deterioration.

Case study and current state of archaeological research

The site is located in the northern outskirts of the village of Staroseltsi, approximately 30 km northwest of Pleven. It lies in the Danubian Plain, on the right bank of the Iskar, about 25 km upstream from its confluence with the Danube. As the toponym of the place "Kale" indicates, the site constitutes a fortress. The fortress lies on a promontory-like extension of the upland plateau (Moesian Platform) formed by the confluence of the Iskar and a small stream. The steep slopes of this promontory-like protrusion provide natural protection on three sides. Its upper part is flat and constitutes an excellent vantage point, overlooking the low-lying valleys of Iskar and of the small stream. The fortress had a very strategic position in the past as it controlled an important road that ran along the lower valley of Iskar and connected the major ancient city of Oescus with other large urban centres south of the mountain passes of Stara Planina, such as Serdica or Philippopolis.

The fortress was first mentioned by Dimitrina Mitova-Dzhonova in her monograph on the archaeological sites of the Pleven District [13], where she provides a very brief description of the site, noting its location, extent, and dating. D. Mitova-Dzhonova also notes that the fortress walls had remained preserved and clearly visible above ground until shortly before she wrote her account, but that they had subsequently become entirely covered and were no longer discernible. In addition, she reports abundant construction ceramics, stones, and pottery fragments, including dolia, found on the site. Based on these observations, D. Mitova-Dzhonova attributes the fortress to the Classical Antiquity.

An additional source of information on the fortress is the Bulgarian website *Български крепости* (Bulgarian Fortresses), which features a brief description of the site published by Milko Gardev, an economist by profession, in 2024. Although the account was not written by an archaeologist and contains several inaccuracies, it provides a more detailed description of the visible archaeological traces than that offered by Mitova-Dzhonova. Gardev also reports that, in recent years, treasure hunters have disturbed the site using heavy machinery, including bulldozers, and that stones from the fortress walls have been reused

in the construction of buildings in the nearby village. This information is particularly significant, as it indicates the reason for the site's severely degraded condition.

The assessment indicates that no formal archaeological investigation has been conducted at the site to date. Consequently, the fortress remains inadequately documented and has not been officially registered in the Archaeological Map of Bulgaria, a specialised information system for recording archaeological sites that incorporates geospatial data and is maintained by the National Archaeological Institute with Museum at the Bulgarian Academy of Sciences (NAIM–BAS). Furthermore, the assessment shows that, for about half a century, the site has been subjected to illicit looting and the removal of stones for use as building material, with heavy machinery reportedly employed in the more recent decades.

Methodology

Two UAV-based photogrammetric surveys were conducted by the research team on 10 May 2026, between approximately 14:00 and 16:00 local time. Data acquisition was performed using UAVs equipped with multispectral and thermal sensors. Both surveys were conducted with the sensors oriented in nadir direction, employing flight plans with 80% forward overlap and 70% side overlap. The flight missions were planned and configured using DJI Pilot 2, with terrain-following enabled to maintain a nominal flight altitude of 50 m above ground level (AGL).

The multispectral survey was conducted using a DJI Mavic 3 Multispectral UAV, equipped with four 5-megapixel multispectral sensors operating in the green, red, red-edge, and near-infrared (NIR) spectral bands, as well as a 20 MP RGB camera with a 4/3-inch CMOS sensor. The survey covered an area of approximately 340,000 m². A total of 3,980 multispectral images were acquired, yielding a ground sampling distance (GSD) of approximately 2 cm/pixel. Additionally, 995 RGB images were captured at a GSD of approximately 1.33 cm/pixel. Radiometric calibration of the multispectral imagery was facilitated by the integrated Downwelling Light Sensor (DLS), which records incident solar irradiance during image acquisition.

The thermal survey was conducted using a DJI Mavic 3 Thermal UAV, equipped with a thermal camera featuring a resolution of 640 × 512 pixels and an uncooled vanadium oxide (VOx) microbolometer sensor, in addition to wide-angle RGB and telephoto cameras. The thermal survey covered approximately 69,000 m² and yielded 787 thermal images, with an approximate GSD of 6.60 cm/pixel. The original radiometric JPEG (R-JPEG) images were converted into thermal TIFF (.tif) files using DJI Image Processor, available from the DJI-Tools-and-Stuff GitHub repository. Although RGB imagery was also acquired during the thermal survey, it was excluded from the analyses presented in the current study.

To improve the absolute positional accuracy of the photogrammetric products, six ground control points (GCPs) were established across the survey area and measured using a Leica GS08 Plus GNSS receiver with real-time kinematic (RTK) corrections. Four of the GCPs were optimised for thermal imagery. The estimated positional accuracy of the GCP measurements is approximately 1–3 cm. The GCPs were incorporated into the photogrammetric processing workflow to improve the georeferencing of the resulting products.

Photogrammetric processing was performed using Pix4Dmapper version 4.10.0 to generate orthomosaics and digital terrain products, as appropriate for each dataset. Subsequent GIS processing was performed in QGIS and included the generation of vegetation indices from the multispectral imagery, as well as the integration and spatial analysis of the resulting photogrammetric products. Ten vegetation indices were calculated: DVI, GCI, GNDVI, MRESRI, NDRE, NDVI, NLI, OSAVI, SAVI and SR.

Results

The orthomosaic and digital surface model (DSM) generated from the RGB imagery (Fig. 1) proved effective for identifying and preliminarily interpreting several architectural and topographic features associated with the fortress and its immediate surroundings. The fortress has an approximately rectangular plan, enclosing an area of ca. 2.5 ha. The northeastern and southeastern walls are the most clearly identifiable features in the RGB-derived datasets. These walls meet at a right angle, and a possible tower appears to have stood at their junction. A ditch is discernible along the exterior of both walls. The northeastern wall extends for approximately 190 m. In its central section, a distinct feature is visible that may represent either a tower or a gate. The southeastern wall is approximately 95 m long. The northwestern wall is also identifiable, although its visibility is considerably reduced by tall vegetation. The southwestern side of the fortress presents the greatest interpretative difficulties. The extent to which the wall is preserved is uncertain, as its visibility is affected by vegetation, erosion, and possible damage resulting from anthropogenic activities. The angle between the southwestern and southeastern walls is approximately 120°. Furthermore, the local

terrain morphology suggests that the southwestern perimeter of the fortress may deviate from the straight alignment observed along the other sides. Instead, it may comprise two distinct wall segments forming the southwestern and western sides of the fortress. If this interpretation is confirmed, the fortress would have a pentagonal rather than a rectangular plan. However, further investigation is required to establish the original configuration of this section of the fortification.

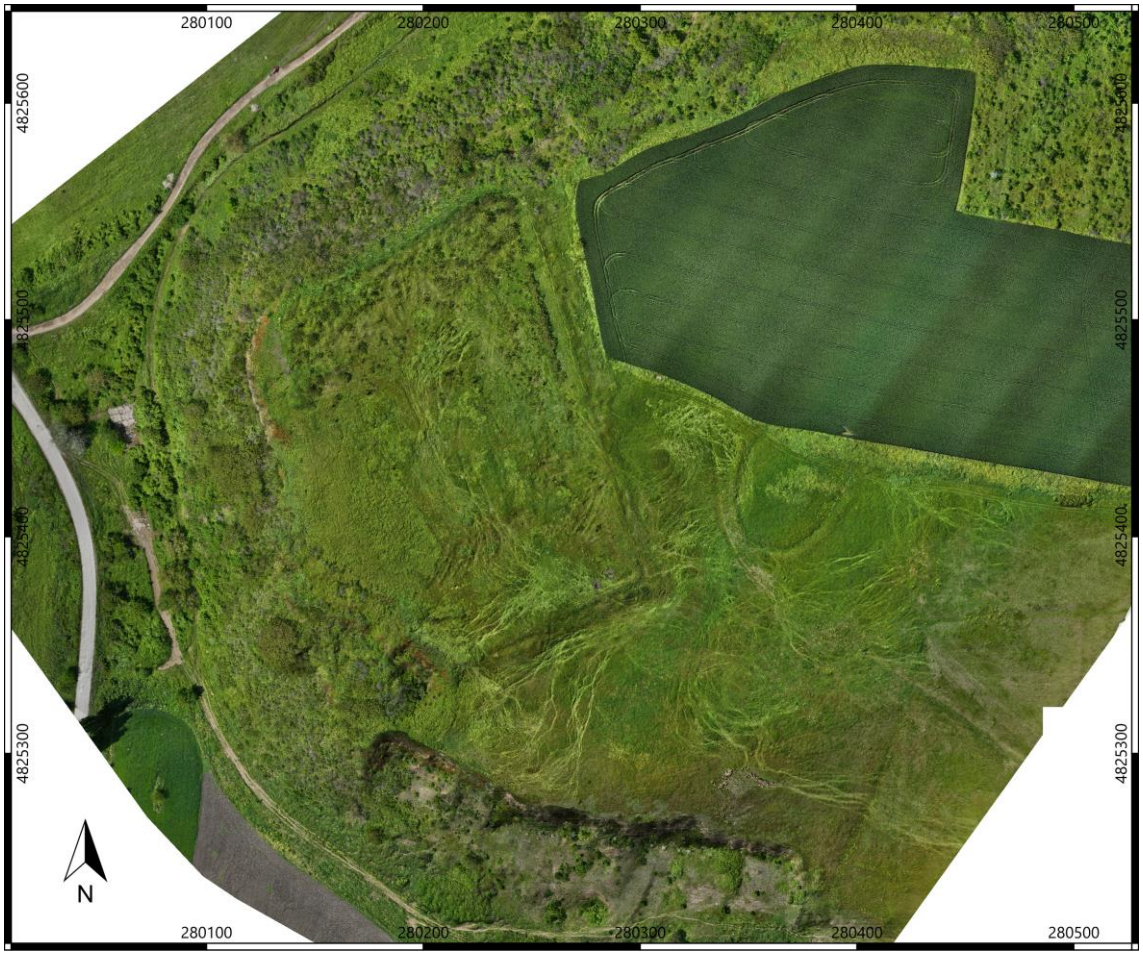


Fig. 1. Orthomosaic with DSM Enhancement of the archaeological site of Staroseltsi-Kaleto (CRS: WGS 84 / UTM zone 35N)

Within the fortress, the UAV-derived datasets reveal the traces of a rectangular structure oriented approximately north–south, which may represent the remains of a building. Its northern and western walls are particularly well defined, while internal partition walls may also be present. The southwestern part of the structure appears to have been severely disturbed or destroyed by modern looting involving the use of heavy machinery, possibly a digger or a bulldozer. Similar traces of relatively recent mechanized disturbance are visible elsewhere within the fortress, particularly in its southeastern and northwestern sectors, indicating that illicit excavation activities have seriously affected the preservation of archaeological features across the site.

Approximately 50 m east of the fortress, a U-shaped earthwork can be identified, consisting of an inner ditch and an outer bank. Examination of historical satellite imagery suggests that this feature originally formed a closed, oval-shaped enclosure. Its northeastern section, however, appears to have undergone alteration or destruction over recent decades. At the present stage of research, the function of this earthwork cannot be determined.

Farther east, a linear earthwork is visible. It follows an approximately north–south alignment, with a slight outward curvature. Its morphology suggests that it may constitute part of an external defensive system, comprising an outer ditch and an inner bank, possibly surmounted by a palisade. The northern section of this earthwork is not discernible in the imagery, as tall wheat crop at the time of the survey obscured the underlying terrain features. The southern section of the earthwork is partially overlain by a network of narrower trenches, which appear to represent a modern drainage system.

Among the four spectral bands recorded by the multispectral sensor, the NIR band provides the clearest representation of the archaeological features. Among the ten vegetation indices evaluated, NDVI, GNDVI, NLI, and SR are the most effective for the identification of archaeological structures.

Figure 2 presents the results of NDVI, which is the most widely employed vegetation index in remote sensing. The map reveals all the archaeological features previously identified in the RGB-derived products. However, certain features are more clearly delineated in the NDVI dataset. These features include the linear earthwork in the eastern part of the site, interpreted as a possible external defensive line, and the network of narrower trenches interpreted as a modern drainage system.

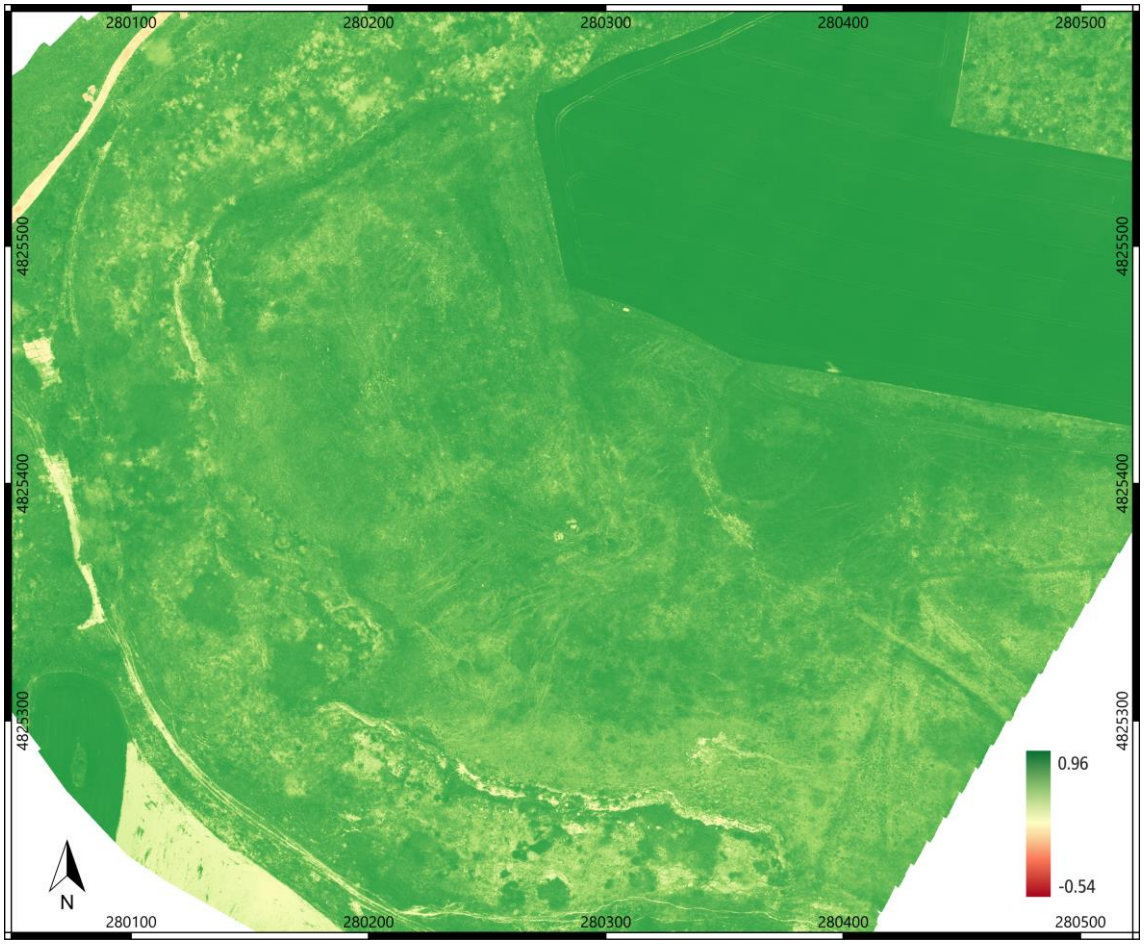


Fig. 2. Normalized Difference Vegetation Index map of the archaeological site of Staroseltsi-Kaleto (CRS: WGS 84 / UTM zone 35N)

The thermal map (Fig. 3) also reveals clearly the fortress and the features associated with it. Moreover, the U-shaped earthwork located approximately 50 m east of the fortress is better distinguishable in the thermal data than in either the RGB-derived products or the NDVI map. One possible explanation is that the ditch associated with this earthwork is deeper and retains more moisture than the ditches running along the fortress walls, which are less clearly visible in the thermal imagery. Greater moisture content may increase the thermal inertia of the soil, causing it to warm more slowly than the surrounding, relatively drier ground. This difference in thermal response could account for the enhanced visibility of the U-shaped earthwork in the thermal map.

The enhanced visibility of certain features in the NDVI and thermal maps highlights the benefits of integrating multispectral and thermal data for archaeological remote prospection, demonstrating their capacity to reveal and delineate features that are less clearly distinguishable in conventional RGB-based photogrammetric products.

Overall, the remote sensing methods employed provide a detailed representation of the fortress and its surrounding landscape. The results enable a preliminary reconstruction of the defensive perimeter, the identification of internal architectural structures, and the recognition of outer earthworks potentially associated with the site's defensive system. Nevertheless, vegetation cover, modern disturbances, and erosion processes limit these investigations. Further investigation is therefore required to explore the site's archaeological potential more comprehensively. In particular, systematic surface archaeological survey, geophysical prospection, and targeted archaeological excavation will be essential to refine the reconstruction of the fortress's original layout, establish its chronology, and clarify the function of the separate features.

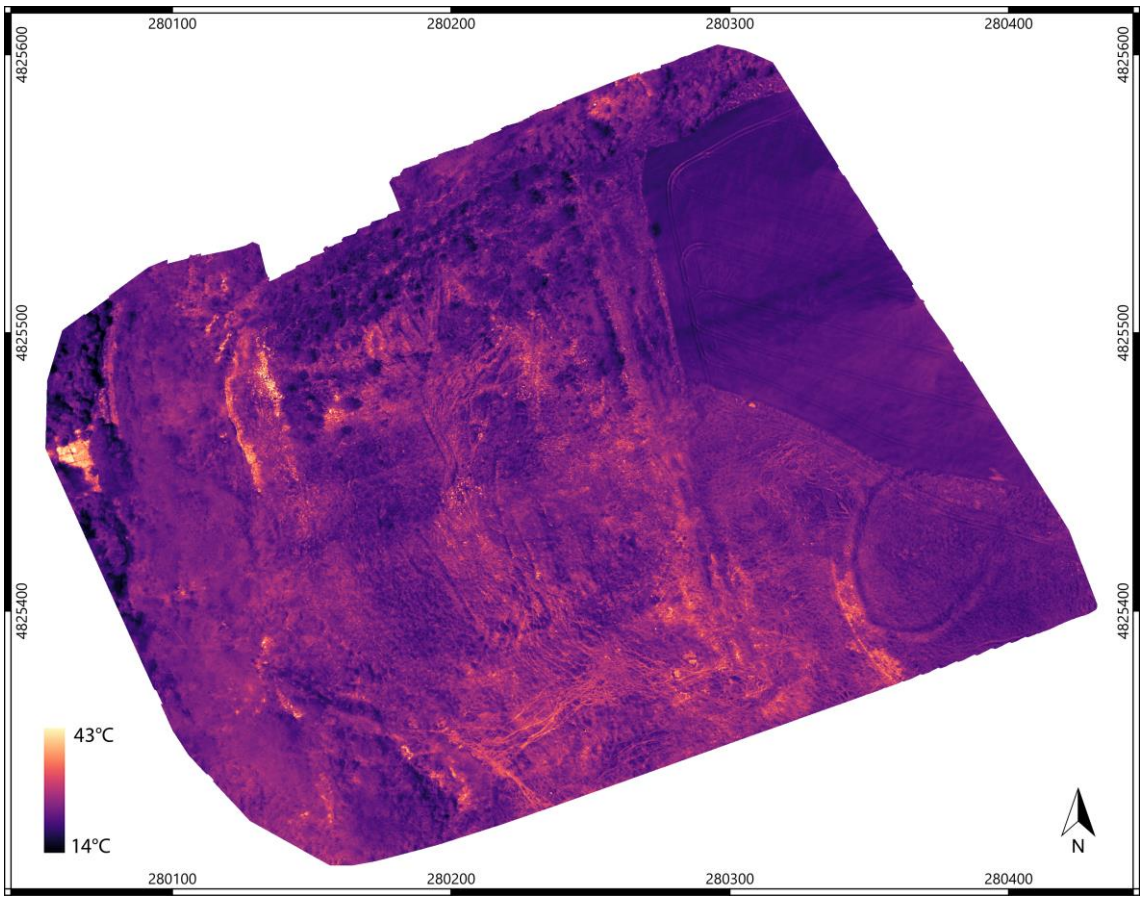


Fig. 3. Thermal map of the archaeological site of Staroseltsi-Kaleto (CRS: WGS 84 / UTM zone 35N)

In addition, our field investigation documented two recent looting pits, indicating ongoing illicit disturbance at the site. These findings highlight the need for the competent authorities to implement appropriate protective measures to prevent further looting and destruction of the site.

Conclusions

The present study shows the potential of multisensor UAV-based photogrammetry for the non-destructive investigation of archaeological sites. Through the integration of RGB, multispectral, and thermal imagery, the main structural elements of the Kaleto fortress near Staroseltsi are identified and delineated in considerable spatial detail. This remote sensing approach provides an initial spatial documentation of the site and establishes a foundation for future monitoring and long-term protection of this vulnerable cultural heritage asset.

The analysis of RGB-derived orthomosaics and terrain models, vegetation index maps derived from multispectral imagery, and thermal maps enables the identification and preliminary interpretation of architectural remains and defensive earthworks. Furthermore, field observations revealed traces of recent looting, indicating that the illicit disturbance of the site, reported about half a century ago, continues to the present day. The integrated datasets reveal the main sections of the fortress perimeter, including the clearly delineated northeastern and southeastern walls, which are flanked by an external ditch and meet at a junction where a tower may have stood. The configuration of the fortress's southwestern perimeter remains largely uncertain owing to vegetation cover, erosion, and modern disturbance; further investigation is therefore required to clarify it. A possible building within the fortress is also identified. In addition, the datasets reveal a U-shaped earthwork east of the fortress and an additional linear earthwork that is interpreted as an external defensive system. Although the features are generally identifiable across the different datasets, their visibility and degree of delineation vary depending on the sensor and data product employed. The RGB-derived products, specifically the DSM, are particularly effective, revealing all the aforementioned features. Yet, the external defensive line and modern drainage trenches in the eastern part of the site are more clearly delineated in the multispectral datasets, while the thermal imagery provides a particularly clear representation of the U-shaped earthwork.

Overall, the present study brings to light a valuable archaeological site that has received limited scholarly attention to date, but holds considerable potential for further research. Its systematic

investigation could make an important contribution to our understanding of ancient fortifications and the history of the region. However, the site has already suffered partial damage and remains at risk of further deterioration, highlighting the urgent need for continued archaeological investigation, systematic monitoring, and the implementation of appropriate protective measures.

Acknowledgements

The article is a result of the implementation of project BG16RFPR002-1.014-0011 Sustainable Development of the Center of Excellence "HeritageBG," funded under the grant aid procedure BG16RFPR002-1.014 “Sustainable Development of Centers of Excellence and Centers of Competence, Including Specific Infrastructures or TheirAssociations from the National Roadmap for Scientific Infrastructure.

References:

1. Eisenbeiss, H., Zhang, L. Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI(5), 2006, pp. 90–96. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000158047.
2. Verhoeven, G. J. J. Providing an archaeological bird's-eye view – an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. Archaeological Prospection, 16(4), 2009, pp. 233–249. https://doi.org/10.1002/arp.354
3. Campana, S. Drones in archaeology. State-of-the-art and future perspectives. Archaeological Prospection, 2017. https://doi.org/10.1002/arp.1569
4. Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., Rinaudo, F. UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). Journal of Archaeological Science, 38(3), 2011, pp. 697–710. https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.022
5. Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F. State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record, 29(146), 2014, pp. 144–166. https://doi.org/10.1111/phor.12063
6. Uribe Agudo, P., Angás Pajas, J., Pérez-Cabello, F., Vicente Redón, J., Ezquerra Lebrón, B. The potential of drones and sensors to enhance detection of archaeological cropmarks: A comparative study between multi-spectral and thermal imagery. Drones, 2(3), 2018, p. 29. https://doi.org/10.3390/drones2030029
7. McLeester, M., Casana, J., Schurr, M. R., Hill, A. C., Wheeler, J. H., III. Detecting prehistoric landscape features using thermal, multispectral, and historical imagery analysis at Midewin National Tallgrass Prairie, Illinois. Journal of Archaeological Science: Reports, 21, 2018, pp. 450–459. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.08.016
8. Brooke, C., Clutterbuck, B. Mapping heterogeneous buried archaeological features using multisensor data from unmanned aerial vehicles. Remote Sensing, 12(1), 2020, p. 41. https://doi.org/10.3390/rs12010041
9. Adamopoulos, E., Rinaudo, F. UAS-Based Archaeological Remote Sensing: Review, Meta-Analysis and State-of-the-Art. Drones, 4(3), 2020, p. 46. https://doi.org/10.3390/drones4030046
10. Materazzi, F., Pacifici, M. Archaeological crop marks detection through drone multispectral remote sensing and vegetation indices: A new approach tested on the Italian pre-Roman city of Veii. Journal of Archaeological Science: Reports, 41, 2022, Article 103235. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103235
11. Ciccone, G. Investigating archaeological remains at Stracciacappe, Rome: Comparing traditional sources with UAV-based multispectral, thermal and microtopographic analysis. Drone Systems and Applications, 12, 2024, pp. 1–16. https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0114
12. Waagen, J., van Hilst, A. Drones over excavations – Enhancing the archaeologist’s eyes: An empirical case study into the deployment of UAS remote sensing as a research tool for archaeological excavation, in Veldhoven, the Netherlands. Journal of Archaeological Science: Reports, 62, 2025, Article 105043. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2025.105043
13. Митова-Джонова, Д. Археологически паметници в Плевенски окръг. София: ДИ „Септември“, 1979.

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

МОНИТОРИНГ НА ПРОСТРАНСТВЕНО-ВРЕМЕВАТА ДИНАМИКА НА КОМПЛЕКС „РОПОТАМО“ ЗА ПЕРИОДА 2013–2025 Г.

Ива Иванова, Наталия Станкова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ivaivanova@space.bas.bg

Ключови думи: *мониторинг, спътникови данни, влажна зона, защитени територии*

Резюме: *Настоящото изследване представя мониторинг на пространствено-времевата динамика на Комплекс „Ропотамо“ за периода 2013–2025 г. чрез спътникови данни. За оценка на измененията в растителната покривка и влажните зони са използвани спътникови данни от Landsat 8 OLI и Sentinel-2. Изчислени са спектралните индекси NDVI и NDWI. Анализирани са предимно изображения от пролетния и есенния сезон с минимална облачност над изследваната територия. Получените резултати позволяват да се проследят годишните изменения в състоянието и пространственото разпределение на растителността, повърхностните води и влажните зони. Установява се относителна устойчивост на основната пространствена структура на екосистемите, съпроводена с локални изменения, най-силно изразени в зоните, свързани с р. Ропотамо и прилежащите и влажни територии.*

SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS MONITORING OF THE ROPOTAMO COMPLEX FOR THE PERIOD 2013–2025

Iva Ivanova, Nataliya Stankova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ivaivanova@space.bas.bg

Keywords: *Arterial blood pressure, pulse wave, electrocardiogram (ECG)*

Abstract: *This study presents the monitoring of the spatial and temporal dynamics of the Ropotamo Complex for the period 2013–2025 using satellite data. Satellite data from Landsat 8 OLI and Sentinel-2 were used to assess changes in vegetation cover and wetland areas. The NDVI and NDWI spectral indices were calculated to characterize vegetation and water-related dynamics. The analysis was based primarily on spring and autumn satellite imagery with minimal cloud cover over the study area. The results allow the assessment of annual changes in the condition and spatial distribution of vegetation, water bodies, and wetlands. The analysis indicates a relatively stable overall spatial structure of the ecosystems, accompanied by local changes that are most pronounced along the Ropotamo River and the adjacent wetland areas.*

Въведение

Комплекс Ропотамо е разположен в югоизточната част на България, по южното Черноморско крайбрежие, в близост до град Приморско и устието на река Ропотамо. Територията попада в рамките на Бургаска област и обхваща долното течение на река Ропотамо, прилежащите влажни зони, крайбрежни горски масиви, пясъчни дюни и лиманни участъци. Резерват „Ропотамо“, който е част от комплекса е сред най-представителните природни обекти по българското Черноморие и се характеризира с висока степен на ландшафтно и биологично разнообразие [1].

Комплексът е включен в мрежата на защитените зони по европейската екологична мрежа Natura 2000 съгласно Директивата за местообитанията (92/43/ЕИО) и Директивата за птиците (2009/147/ЕО) [2]. Територията попада и в обхвата на Рамсарската конвенция като влажна зона с международно значение. През последните десетилетия крайбрежните и влажните екосистеми са подложени на нарастващ антропогенен натиск, включително урбанизация, туристическа дейност, промени в хидрологичния режим, ерозионни процеси и

климатични изменения. Тези фактори водят до промени в структурата и динамиката на растителната покривка, водните площи и екологичното състояние на местообитанията. Поради това мониторингът на защитените територии се превръща в ключов инструмент за оценка на екологичните промени и за подпомагане на природозащитното управление [1].

Поради сложната екологична структура на резервата и динамичния характер на влажните екосистеми, използването на дистанционни методи за наблюдение чрез спътникови данни представлява ефективен подход за дългосрочен мониторинг на природната среда.

Данни и методи

За изследване на пространствено-времевата динамика на Комплекс „Ропотамо“ за периода 2013–2025 г. са използвани мултиспектрални сателитни данни от Landsat 8 OLI и Sentinel-2 MSI, позволяващи проследяване на измененията в растителната покривка и водните обекти [3].

При подбора на спътниковите данни е поставен акцент върху пролетния и есенния сезон, като са използвани изображения с минимална или липсваща облачност над изследваната територия. Пролетните сцени позволяват проследяване на активното развитие на растителността и промените във водния режим, докато есенните отразяват състоянието на растителната покривка в края на вегетационния период.

Таблица 1. Подбор на спътникови данни

Дата	Спътник	Дата	Спътник
19.06.2013 г.	Landsat 8	12.04.2021 г.	Sentinel-2
21.05.2014 г.	Landsat 8	19.09.2022 г.	Sentinel-2
11.07.2015 г.	Landsat 8	02.05.2023 г.	Sentinel-2
16.08.2016 г.	Sentinel-2A	24.09.2023 г.	Sentinel-2
10.09.2017 г.	Sentinel-2A	06.05.2025 г.	Sentinel-2
10.09.2018 г.	Sentinel-2B	10.09.2025 г.	Sentinel-2
26.08.2019 г.	Sentinel-2B		

За оценка на динамиката на растителната покривка и водните обекти в комплекс „Ропотамо“ са приложени два спектрални индекса – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и NDWI (Normalized Difference Water Index).

Нормализираният разликов вегетационен индекс (NDVI) е широко използван показател за дистанционно характеризиране на растителната покривка. Индексът отразява контраста между поглъщането на червената светлина от хлорофила и високата отражателна способност на зелената растителност в близкия инфрачервен диапазон. Стойностите на NDVI теоретично варират между −1 и +1. Високите положителни стойности са характерни за плътна и добре развита растителност, докато ниските и отрицателните стойности са характерни за вода, голи почви, пясъчни повърхности и други територии с ниска растителна покривка[4, 5]. В настоящото изследване NDVI се използва за проследяване на пространствените и времевите изменения на растителността в комплекса“, включително крайречните и лонгозни гори, тревната и храстовата растителност, влажните местообитания и растителността в близост до речното корито.

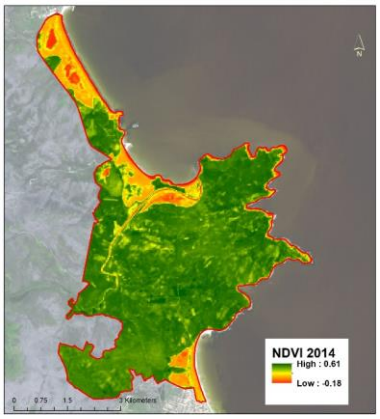
Нормализираният разликов воден индекс (NDWI) се използва за откриване и мониторинг на повърхностни води и за разграничаване на водните обекти от сухоземните компоненти. В настоящото изследване се използва класическата формулировка на NDWI, базирана на зеления и близкия инфрачервен спектрален диапазон [5, 6]. NDWI позволява да бъдат идентифицирани основните повърхностни води в изследваната територия [7, 8]. При комплекс „Ропотамо“ индексът е особено подходящ за проследяване на р. Ропотамо, лиманната зона, влажните зони и сезонно заливаните територии. Получените тематични карти позволяват да се установят пространствените изменения на водните площи и тяхната динамика през изследвания период. Използването на изображения от пролетта и есента позволява и по-добро характеризиране на динамиката на водните обекти чрез NDWI. Това е особено важно за наблюдаваната територия, където речната система, лиманната зона, влажните местообитания и сезонно заливаните територии са тясно свързани с изменението на водния баланс.

Резултати

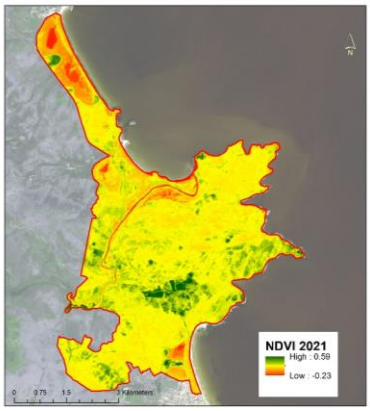
Междугодишен пролетен мониторинг на NDVI за периода 2013–2025 г.

За пролетния период 2013–2025 г. NDVI показва съществени междугодишни различия във вегетационната активност (фиг. 1). През 2013, 2014 и 2021 г. максималните стойности са сходни (0,59–0,61), като през 2021 г. се наблюдава леко по-слабо развитие на растителността.

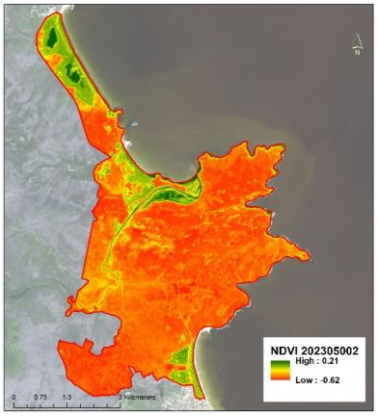
През 2023 г. (Фиг. 1 В) е регистриран значителен спад на NDVI до максимум 0,21, което показва по-слабо изразена вегетационна активност към датата на заснемане. През 2025 г. се установява отчетливо възстановяване, като максималният NDVI достига 0,63 и високите положителни стойности отново обхващат значителна част от изследваната територия.



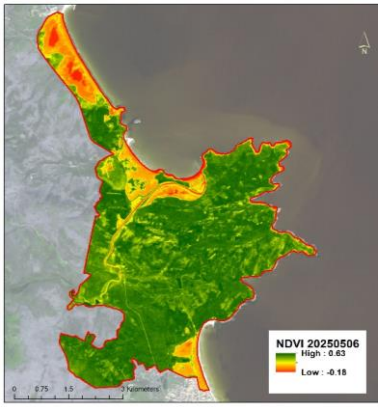
А) NDVI 2014



Б) NDVI 2021



В) NDVI 2023

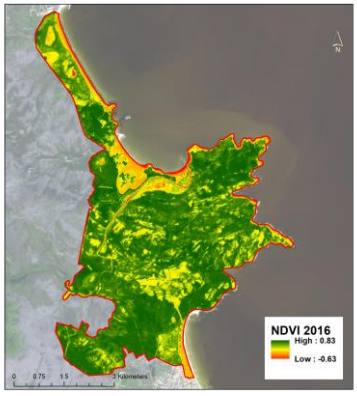


Г) NDVI 2025

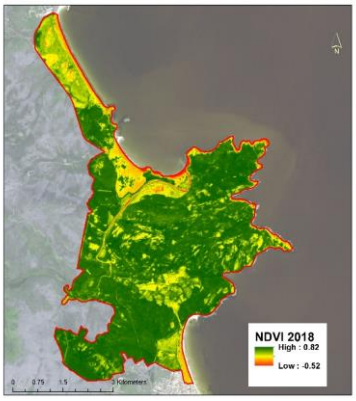
Фиг. 1. Междугодишен пролетен мониторинг на NDVI за периода 2013–2025 г.

Междугодишен есенен мониторинг на NDVI за периода 2013–2025 г.

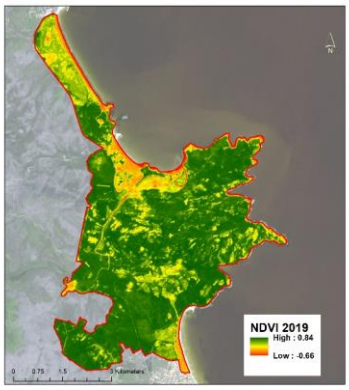
За есенния период 2016–2025 г. (фиг. 2) NDVI показва висока вегетационна активност през 2016–2019 г., с максимални стойности между 0,73 и 0,84, като най-висока стойност е отчетена през 2019 г. (0,84). След 2019 г. се наблюдава понижение на максималните стойности до 0,60 през 2022 г. и 0,56 през 2023 г., което показва по-слабо изразена вегетационна активност. През 2025 г. е регистрирано леко повишение до 0,58, но стойностите остават по-ниски спрямо периода 2016–2019 г. Като цяло резултатите очертават понижение на максималните NDVI стойности през по-късните години на изследвания есенен период.



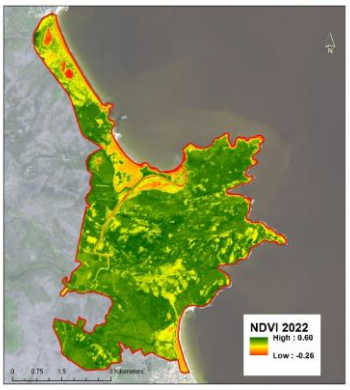
А) NDVI 2016



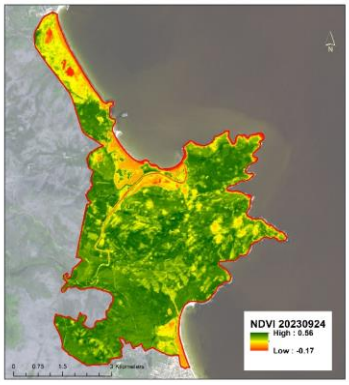
Б) NDVI 2018



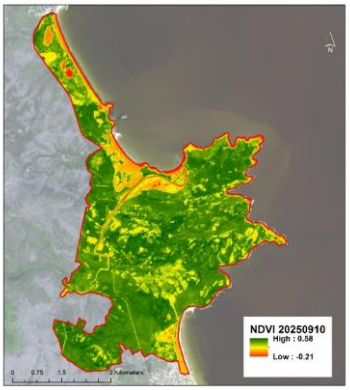
В) NDVI 2019



Г) NDVI 2022



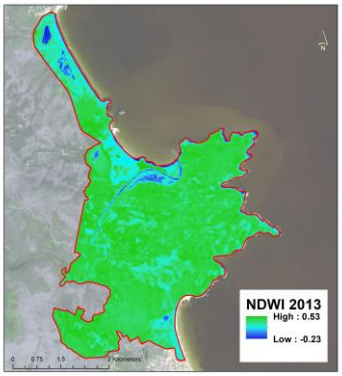
Д) NDVI 2023



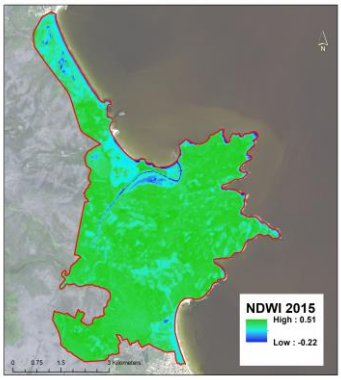
Е) NDVI 2025

Фиг. 2. Междугодишен есенен мониторинг на NDVI за периода 2013–2025 г.

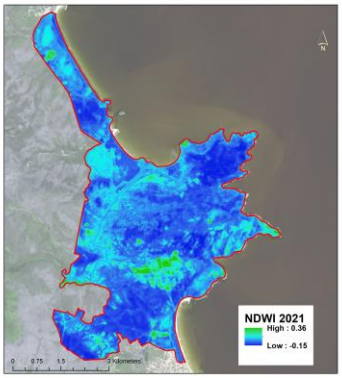
Междугодишен пролетен мониторинг на NDWI за периода 2013-2025 г.



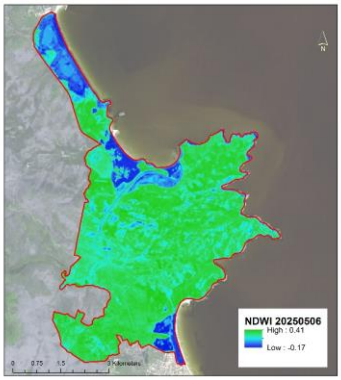
А) NDWI 2013



Б) NDWI 2015



В) NDWI 2021



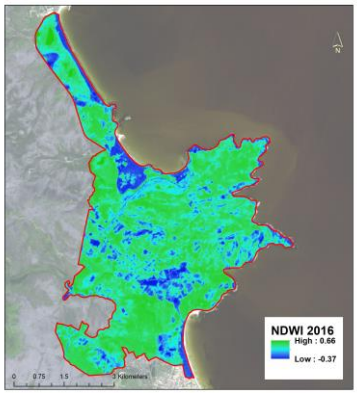
Г) NDWI 2025

Фиг. 3. Междугодишен пролетен мониторинг на NDWI за периода 2013–2025 г.

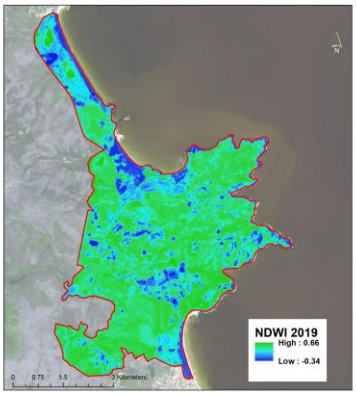
Анализът на NDWI за периода 2013–2025 г. (фиг. 3.) показва относително устойчиво пространствено разпределение на водните и влажните територии, при наличие на локални междугодишни изменения. Стойностите варират от –0,23 до 0,53 през 2013 г. и от –0,22 до 0,51 през 2015 г., като по-високите стойности са характерни основно за р. Ропотамо и прилежащите влажни участъци. През пролетния период 2021–2025 г. максималният NDWI нараства от 0,36 през 2021 г. до 0,42 през 2023 г. и 0,41 през 2025 г., като през последните две години водните и водонаситените площи са по-ясно изразени. Като цяло резултатите показват запазване на основната пространствена структура на водните и влажните територии при локално проявена междугодишна динамика.

Междугодишен есенен мониторинг на NDWI за периода 2013–2025 г.

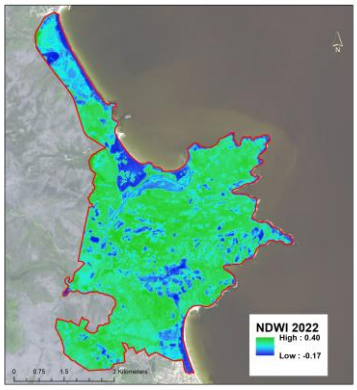
За есенния период 2016–2025 г. NDWI показва отчетлива междугодишна динамика (фиг. 4). Максималните стойности са 0,66 през 2016 и 2019 г., след което намаляват до 0,40 през 2022 г. и 0,35 през 2023 г., което показва по-слабо проявление на водните и водонаситените площи. През 2025 г. се наблюдава частично повишение до 0,39, но стойностите остават под нивата от 2016–2019 г. Независимо от тези изменения, речното корито на Ропотамо и основните влажни участъци запазват ясно изразено пространствено присъствие през целия разглеждан период.



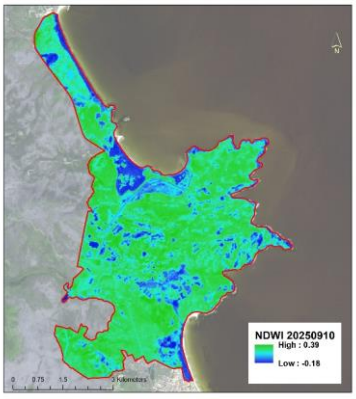
А) NDWI 2016



Б) NDWI 2019



В) NDWI 2022

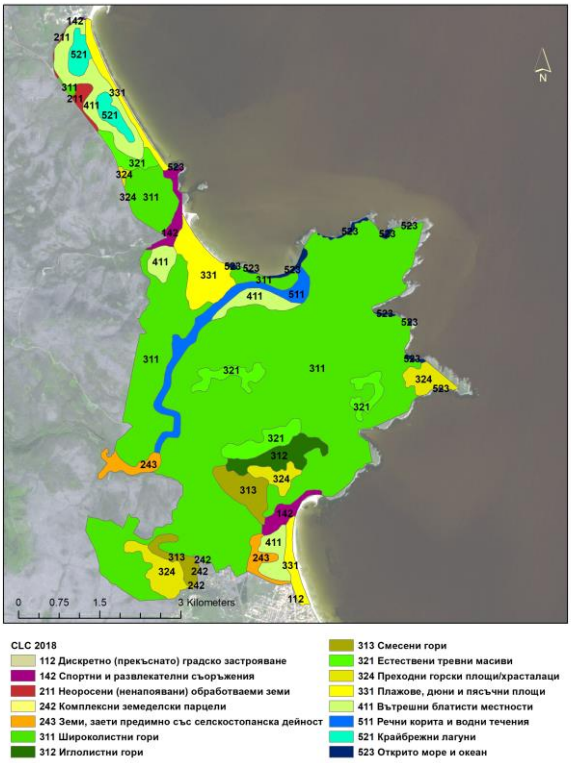


Г) NDWI 2025

Фиг. 4. Междугодишен есенен мониторинг на NDWI за периода 2013–2025 г.

Верификация на данните от спътниковите изображения

За независима пространствена верификация на резултатите от NDVI и NDWI е използван слой CORINE Land Cover (CLC) 2018 г. (фиг. 5) [9]. Извършено е пространствено съпоставяне между разпределението на спектралните индекси и основните класове земно покритие в границите на комплекс „Ропотамо“. При NDVI е оценено съответствието на високите стойности с горските и храстовите територии (CLC 311, 312, 313 и 324), докато при NDWI е проследено съответствието с речните корита и водните течения (511), вътрешните блатисти местности (411) и крайбрежните лагуни (521). Полученото пространствено съответствие между спектралните индекси и референтните класове на CLC се използва като индикативна верификация на резултатите от дистанционното наблюдение.



Фиг. 5. CLC 2018 [9]

Заключение

Съвместният анализ на NDVI и NDWI индексите за периода 2013–2025 г. показва сезонна и междугодишна динамика на растителната покривка и влажните зони в Комплекс „Ропотамо“, при относително запазване на основната им пространствена структура. NDVI отчита понижение на вегетационната активност през пролетта на 2023 г., последвано от възстановяване през 2025 г. Резултатите от NDWI показват по-високи стойности през пролетта на 2023 и 2025 г., докато през есенните периоди след 2019 г. се наблюдава тенденция към понижение, с леко повишение през 2025 г. Като цяло установените колебания в двата индекса отразяват динамичния характер на екосистемите и тяхната чувствителност към сезонните и междугодишните изменения, без да се очертава еднозначна дългосрочна тенденция.

Литература:

1. ПУ Резерват Ропотамо, МОСВ, България, 2018. https://www.moew.government.bg/static/media/ups/tiny/filebase/Nature/Protected_areas/Planove_za_upravlenie/Ropotamo_01_2018.pdf
2. EEA (European Environment Agency), 2021. *Natura 2000 and biodiversity protection in Europe*. https://www.eea.europa.eu
3. European Space Agency, 2020. *Sentinel-2 mission overview*. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2
4. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026
5. Ivanova, I., Spasova, T., Stankova, N. Using Sentinel-2 data for efficient monitoring and modeling of wetland protected areas, 2023. Proc. SPIE 12786, Ninth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment 12786, ISSN:0277786X. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2681790, 127861U-1-127861U-8
6. Ivanova I., Stankova N., Borisova D., Spasova T., Dancheva A. Dynamics and development of Alepu marsh for the period 2013-2020 based on satellite data, 2021. Proc. SPIE 11863, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XII, 1186315, 11863, ISBN:9781510645707, ISSN:0277-786X. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2597726, 1186315-1-1186315-9
7. Jelev, G., M. Chanev. Using spectral indexes and spectral channels combination in different colour models for satellite imagery mapping. Ecological Engineering and Environment Protection, 2023, 3–4, 26–47.
8. Ceccato, P., S. Flasse, S. Tarantola, S. Jacquemond, J.M. Gregoire. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing of Environment, 2001, 77, 22–33.
9. CLC2018 https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac

AN EXPERIMENT FOR MONITORING THE "SNEZHNIKA" GLACIERET IN THE PIRIN MOUNTAINS USING HIGH- AND MEDIUM-RESOLUTION SATELLITE DATA

Andrey Stoyanov, Nadya Yanakieva, Temenuzhka Spasova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: andreiikit@space.bas.bg;

Keywords: *Satellite data, Sentinel-2, Normalized Difference Snow Index (NDSI), glacieret*

Abstract: *This study presents the results of monitoring the "Snezhnika" glacieret in the Pirin Mountains, utilizing a collection of optical satellite imagery from the Landsat 7, RapidEye, WorldView-2, Landsat 8, Sentinel-2 MSI, and PlanetScope missions over a 27-year period (1999–2026). The methodology involved processing pseudo-composite images and generating the Normalized Difference Snow Index (NDSI). Based on the resulting values, the spatial dynamics of the "Snezhnika" micro-glacier were monitored through the calculation of the surface areas covered by firn mass.*

ОПИТ ЗА МОНИТОРИНГ НА МИКРОЛЕДНИК „СНЕЖНИКА" В ПИРИН ПЛАНИНА ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА СПЪТНИКОВИ ДАННИ С ВИСОКА И СРЕДНА РАЗДЕЛИТЕЛНА СПОСОБНОСТ

Андрей Стоянов, Надя Янакиева, Теменужка Спасова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: andreiikit@space.bas.bg

Ключови думи: *Спътникови данни, Sentinel-2, нормиран разликов снежен индекс (NDSI), микроледник*

Резюме: *В проведеното изследване са представени резултати от извършен мониторинг на микроледник „Снежника" от територията на Пирин планина чрез използване на набор от оптични спътникови изображения от мисиите Landsat 7, Rapideye, Worldview-2, Landsat 8, Sentinel-2 MSI и Planetscope за период от 27 години (1999-2026). Извършена е обработка на псевдокомпозитни изображения, генериран е нормиран разликов снежен индекс NDSI, и на база получените стойности е проследена динамиката на пространственото разпределение на микроледник „Снежника" след като са изчислени площите заети от фирнова маса.*

Introduction

Small glacial bodies, glacierets, and perennial snow-firn fields in high-mountain regions serve as sensitive indicators of changes in climatic and microclimatic conditions. Due to their small size and limited reserves of firn and ice, their area and volume respond relatively quickly to changes in air temperature, the amount and seasonal distribution of precipitation, the duration of snow cover, and the intensity of summer ablation. Their stability depends not only on the regional climate but also on local factors such as altitude, aspect, topographic shading, terrain morphology and lithology, as well as the redistribution of snow by avalanches and wind [1–4]. Consequently, small glacial bodies can function as natural indicators of the interaction between climate variability and local geomorphological conditions.

The Snezhnika glacieret is located in the Golemiya Kazan cirque in the Northern Pirin Mountains, Southwestern Bulgaria, situated directly beneath the northeastern slopes of Vihren Peak (2914 m) at approximately 41°46′ N and 23°24′ E, at an elevation of approximately 2400–2500 m (Fig. 1), and is considered the southernmost extant micro-glacier in Europe [1] Its location below 42° N well below the regional climatic snowline makes it an exceptionally suitable site for studying

the conditions under which perennial snow, firn, and ice can persist long-term within a climatic regime that lies at the threshold for contemporary glaciation.

Snezhnika is a small yet stable perennial body of snow, firn, and ice, with an average surface area of approximately 0.5 ha (≈ 5000 m²). This area fluctuates significantly, both within individual seasons and from year to year [4]. Its minimum extent is typically reached at the end of the ablation season, reflecting the net balance between snow accumulation during the colder part of the year and the loss of snow and ice mass throughout the spring and summer. Due to its small dimensions, Snezhnika is subject to substantial interannual variability, making it a sensitive indicator of both temperature conditions during the ablation season and the volume and redistribution of the winter snowpack [3, 4].

The specific geological and geomorphological conditions of the Northern Pirin Mountains are essential for the formation and preservation of the Snezhnik glacieret (perennial snow patch). The high-mountain zone surrounding the peaks of Vihren and Kutelo is composed primarily of marble. The interplay between Pleistocene glaciation, karst terrain, and cryogenic processes has shaped a distinctive glacio-karst landscape, characterized by deep cirques, steep rock faces, scree slopes, moraine deposits, and various karst landforms [3, 5]. The Snezhnik is situated at the base of the Golemiya Kazan cirque, beneath the steep northeastern marble face of Vihren Peak. This morphology provides prolonged topographic shading, limiting the direct solar radiation that reaches the snow and firn surface. At the same time, the steepness of the slopes facilitates snow accumulation through avalanches and wind transport; this increases the local snow mass beyond what would result from direct snowfall alone [1–3].

An additional factor is the geological nature of the terrain and the presence of a substrate composed of marble rocks. Their light-colored surface possesses a relatively high reflectivity, absorbing a smaller portion of incoming shortwave solar radiation compared to darker rock surfaces. The influence of this factor on Snezhnika should be viewed as part of a complex local radiation balance, which depends on a combination of albedo, slope inclination, aspect, shading, and the geometry of the surrounding slopes. The karst-related fracturing of the marble substrate facilitates the rapid drainage of water resulting from the melting of snow and ice, thereby limiting its prolonged retention around the base of the snow-ice body [3, 4]. It is significant that the two persistent contemporary micro-glaciers in the Pirin Mountains Snezhnika and Banski Suhodol are located precisely within the high-mountain marble section of the massif. This underscores the importance of local lithological and topographical conditions for their existence [3].

Snezhnika is not merely a seasonally accumulated snow patch. The presence of perennial firn and ice, the distinct morphological features associated with the snow-ice body, and the significant thickness determined via geophysical methods justify its classification as a glacieret (micro-glacier) [1, 2, 6]. Geophysical investigations using Ground-Penetrating Radar (GPR) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) further reveal the existence of subsurface zones with high electrical resistivity beneath and in the immediate vicinity of Snezhnika.



Fig. 1. Snezhnika glacieret, Pirin mountain, 26 August 2026 © photo credits: Nadya Yanakieva

In addition to traditional field and geophysical measurements, remote sensing enables the systematic monitoring of the dynamics of small snow-firn bodies and the spatial comparison of results. The use of optical satellite data for snow monitoring relies on snow's characteristic spectral reflectance profile—high reflectivity in the visible spectrum and significant absorption in the shortwave infrared range [7]. This property forms the basis of the Normalized Difference Snow Index (NDSI), which is widely used for distinguishing and mapping snow cover. Existing research on Snezhnika has focused

primarily on long-term field measurements of its surface area, the climatic factors driving interannual dynamics, its glaciokarst morphology, the internal structure of the snow-firn body, and the presence of permafrost [2–6]. In contrast, systematic multi-temporal analysis of Snezhnika based on satellite data remains less developed; this presents an opportunity to complement existing ground-based observations with results derived from satellite data.

The present study aims to analyze the spatiotemporal dynamics of the Snezhnika micro-glacier by integrating multispectral optical imagery from the archives of the Landsat 7, RapidEye, WorldView-2, Landsat 8, Sentinel-2 MSI, and PlanetScope missions over a 27-year period (1999–2026). The primary focus is on determining changes in the spatial extent of the snow-firn body. The study seeks to supplement existing long-term field and geophysical observations and to evaluate the potential of high-spatial-resolution satellite data for monitoring one of the smallest and southernmost contemporary glacial bodies in Europe.

Methods and data

SWIR-NIR-Green band composite

SWIR-NIR-Green band composites used in the study are consisted of bands: **5** (1.55–1.75 µm), **4** (0.76–0.90 µm), **2** (0.52–0.60 µm) for Landsat 7 ETM+ [8]; **6** (1.57–1.65 µm), **5** (0.85–0.88 µm), **3** (0.53–0.59 µm) for Landsat 8-9 OLI [9] and **11** (1.61 µm), **8** (832 µm), **3** (559 µm) for Sentinel-2 MSI [10]. It allows to highlights areas of snow cover distribution in the study area and serves as reference for monitoring, analysis and comparison with the results obtained from the applied indices NDSI and firn area calculation.

NIR-Red-Green band composite

Are used in the for the sensors with high resolution (Rapideye, Worldview-2 and Planetscope [11]) where SWIR bands are missing and were used for validation of Sentinel-2 super-resolved imagery and for contouring of the glacieret and calculation its area size.

Normalized Difference Snow Index (NDSI)

Normalized Difference Snow Index (NDSI) [12] (Equation 1) represents normalized difference of two bands in the visible green and short-wave infrared (SWIR) parts of the spectrum. Snow has high reflectance in the visible part of the electromagnetic spectrum and high absorption in the NIR or SWIR parts of the spectrum, whereas the reflectance of most clouds remains high in those parts of the spectrum, allowing good separation of most clouds and snow as the accepted NDSI threshold value used to determine snow cover is 0.4. [12].

(1) $$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$$

The generated, calibrated and post-processed NDSI maps with the resulted values were used for contouring the snow-firn mass and area calculation in Arcgis Pro and used for correlation with the terrain data obtained by Grunevald and Gachev [1, 4].

Deep learning model SEN2SR

The model SEN2SR increases the resolution of Sentinel-2 imagery from 10m / px to 2.5 m / px and enables finer discrimination of small-scale land cover features, providing valuable information and improves visual interpretability of satellite images and enhances the reliability of downstream tasks such as classification, segmentation, and change detection, where high spatial detail and consistent spectral information are essential [13]. The SEN2SR deep learning framework preserving spectral and spatial alignment consistency of Sentinel-2 native resolution, ensuring realistic and artifact-free enhancements [13].

S2DR4 (Sentinel-2 Deep Resolution 4)

S2DR4 is a deep-learning super-resolution AI model developed by Gamma Earth. It is designed to upscale free public European Space Agency (ESA) Sentinel-2 satellite imagery from its native 10-meter and 20-meter resolution up to a sharp 1-meter per pixel resolution across all 10 spectral bands [14]

All satellite images (Table 1) were selected at the end of the ablation period for the glacier under study a period which, for the Pirin Mountains, encompasses approximately the months of September and October, depending on the first snowfall of the upcoming winter season (the beginning of the accumulation period).

Table 1. Timeframe of the study and data used

Time of acquisition (Year/Month/day)	Satellite, Sensor	Spectral bands	Spatial resolution (m/px)
07.09.1999 31.08.2000 28.09.2001 27.08.2010	Landsat 7 ETM+	Green (B2) NIR (B4) SWIR (B5)	15 x 15 pansharpened
10.09.2011 24.09.2012 04.09.2013 18.09.2015	RapidEye	Green (B2) Red (B3) NIR (B5)	5 x 5
24.09.2014	Landsat 8 OLI	Green (B3) NIR (B5) SWIR (B6)	15 x 15 pansharpened
15.08.2016	Planetscope	Green (B4) Red (B6) NIR (B8)	3 x 3
16.09.2017 and 18.09.2017 06.10.2018 and 27.09.2018 21.09.2019 and 21.09.2019 20.09.2020 and 21.09.2020 25.09.2021 and 22.09.2021 25.09.2022 and 09.09.2022 09.09.2023 and 09.09.2023 25.08.2024 and 24.08.2024 19.09.2025 and 22.09.2025 14.09.2026 and 09.09.2026	Sentinel 2 MSI and Planetscope	Green (B3) NIR (B8) SWIR (B11) Green (B4) Red (B6) NIR (B8)	1 x 1 (S2DR4) 2.5 x 2.5 (SEN2SR) 3 x 3

Results

Different samples of the results obtained by the applied methodology for calculating area of the glacieret including maps of Landsat 7 pansharpened image (Fig. 2, 3), Landsat 8 pansharpened image (Fig. 4) and super-resolved Sentinel-2 imagery (Fig 5, 6, 7, 8, 9). On Fig.8 a Planetscope image with native spatial resolution of 3 m in NIR-Red-Green band composite and super-resolved Sentinel-2 image with spatial resolution of 2.5 m in SWIR-NIR-Green band composite are shown for visual comparison and verification of glacieret's appearance and its extent. All the area sizes are calculated by contouring the outline of glacieret's patch highlighted in generated NDSI values for Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel 2 imagery where SWIR bands are available and in NIR-Red-Green band pseudocomposites for Rapideye and Planetscopte imagery where SWIR bands are missing.

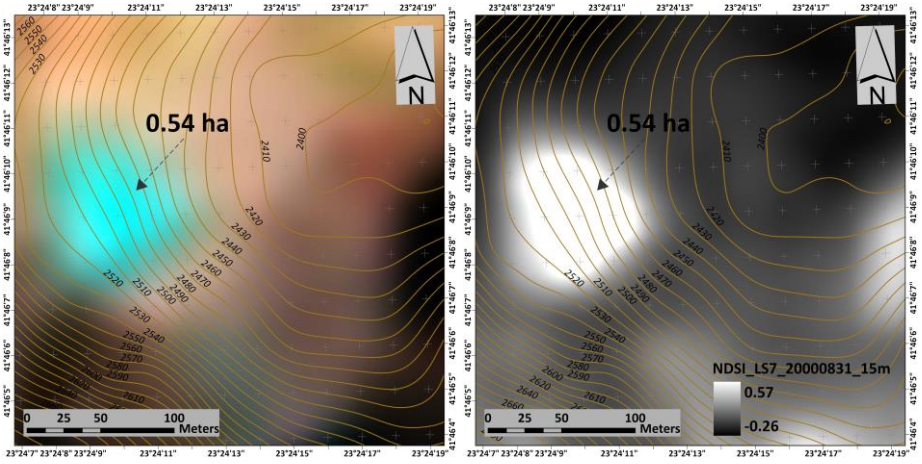


Fig. 2. Maps of pansharpened Landsat 7 image (15m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 31.08.2000

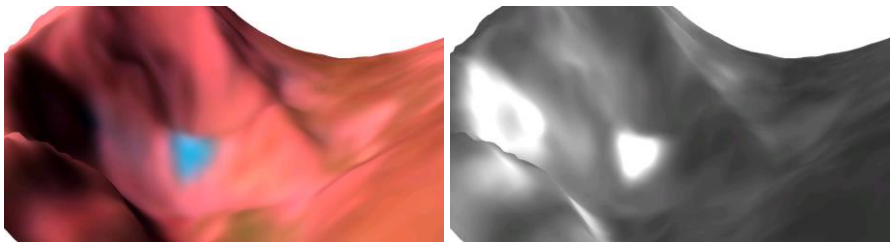


Fig. 3. 3D Maps of pansharpened Landsat 7 image (15m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 31.08.2000

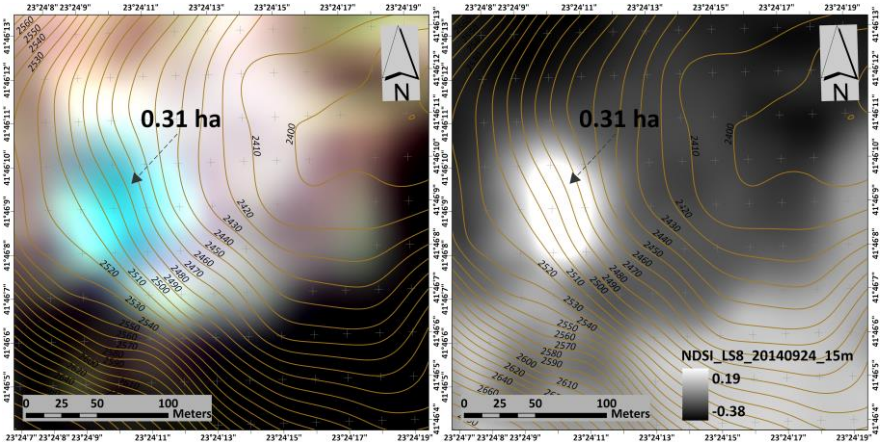


Fig. 4. Maps of pansharpened Landsat 8 image (15m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 24.09.2014

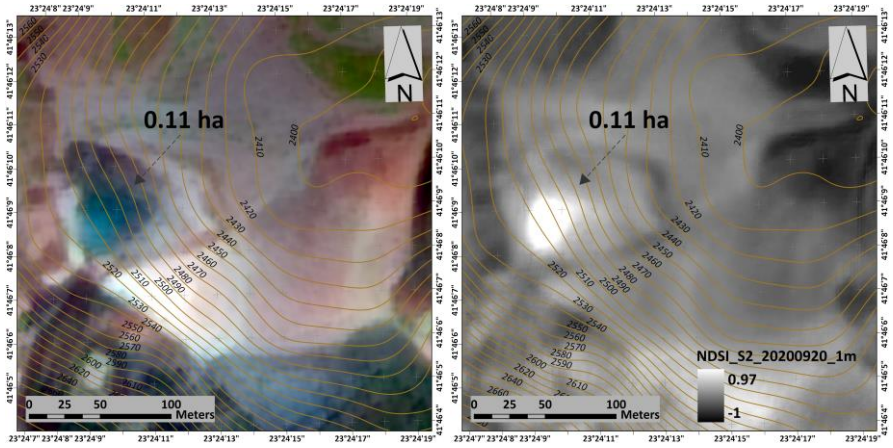


Fig. 5. Maps of super-resolved Sentinel-2 image (1m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 20.09.2020

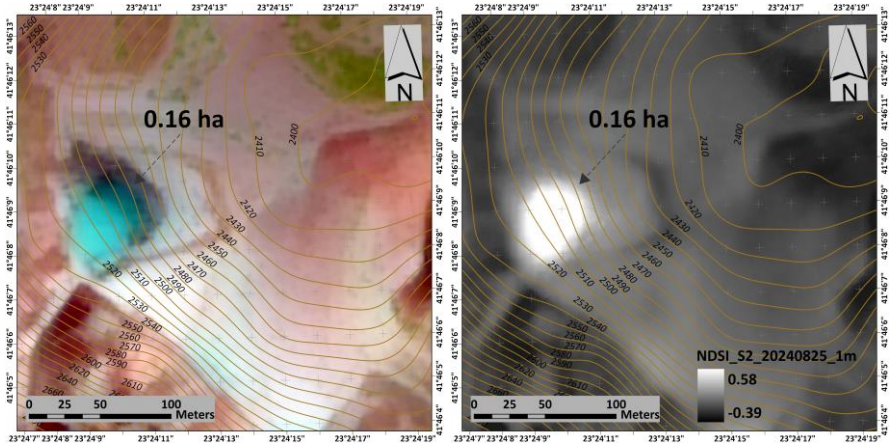


Fig. 6. Maps of super-resolved Sentinel-2 image (1m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 25.08.2024

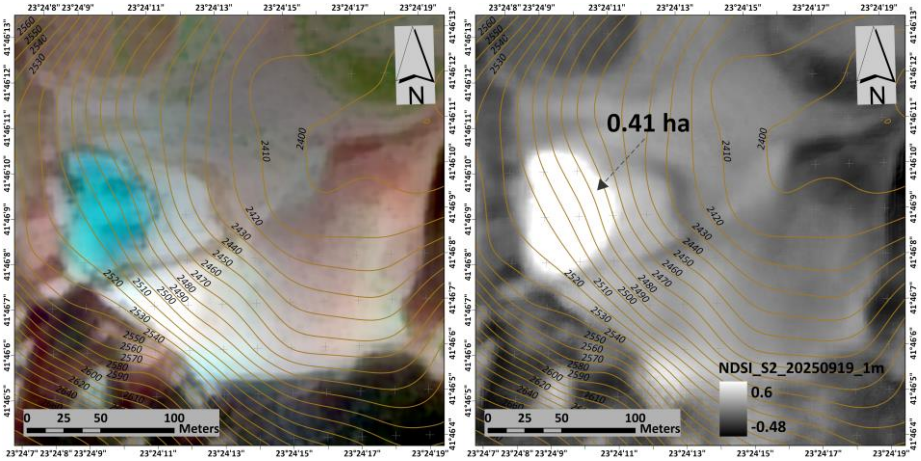


Fig. 7. Maps of super-resolved Sentinel-2 image (1m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 19.09.2025

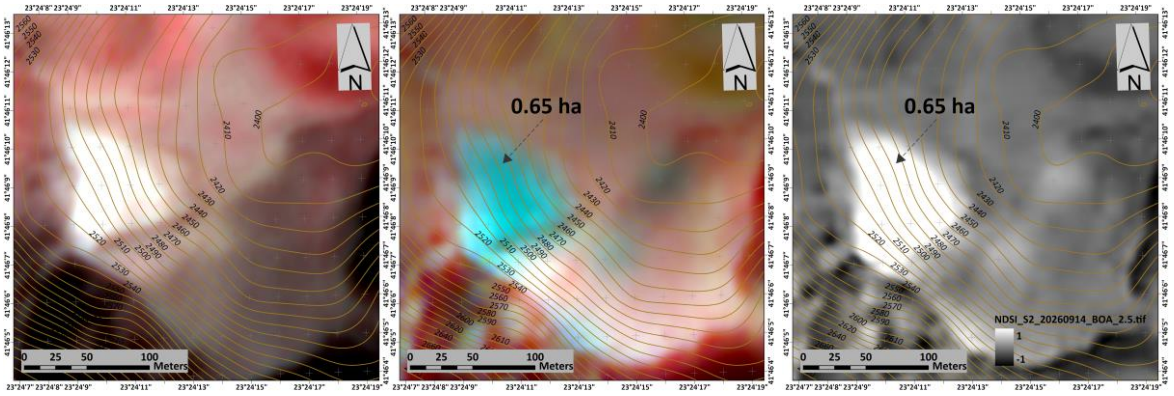


Fig. 8. Maps Planetscope image from 09.09.2026 (Image © 2026 Planet Labs PBC) and super-resolved Sentinel-2 image (1m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 14.09.2026

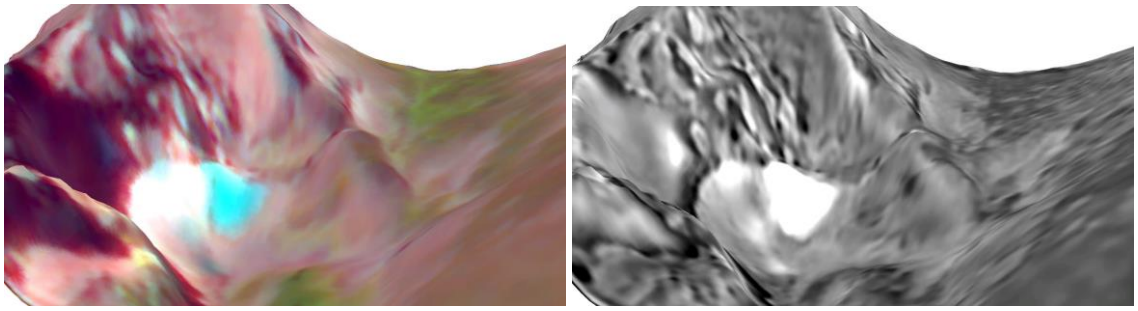


Fig. 9. 3D Maps of super-resolved Sentinel-2 image (1m / px) in SWIR-NIR-Green pseudocomposite and NDSI values from 14.09.2026.

The results with calculated areas of the glacieret for the whole temporal period are presented on table 2 and Fig.10. In 2020 the size of the Snezhnika glacieret reached a minimum area of 0.10 ha and maximum values are in the years 2010, 2021 and 2026. For the studied time period a small overall negative trend is monitored while preserving its average size of 0.5 ha.

Table 2. Calculated areas by years, methods, satellite data and *in-situ* data

Years	Calculation Method **NDSI or RGB pseudocomposite (contouring)**	Calculated Firn Area by Satellite data (*ha*)	*In-situ* data by Grunevald, Gachev,(*ha*)
1999	NDSI	**0.43**	**0.45**
2000	NDSI	**0.54**	**0.52**
2001	NDSI	**0.37**	**0.45**
2010	NDSI	**0.67**	**0.69**
2011	RGB pseudocomposite	**0.54**	**0.54**
2012	RGB pseudocomposite	**0.59**	**0.37**
2013	RGB pseudocomposite	**0.53**	**0.65**
2014	NDSI	**0.31**	**0.39**
2015	RGB pseudocomposite	**0.51**	**0.52**
2016	RGB pseudocomposite	**0.64**	**0.51**
2017	NDSI	**0.26**	**0.32**
2018	NDSI	**0.61**	**0.64**
2019	NDSI	**0.47**	**0.37**
2020	NDSI	**0.10**	**0.30**
2021	NDSI	**0.67**	**0.53**
2022	NDSI	**0.47**	**0.45**
2023	NDSI	**0.35**	**No data**
2024	NDSI	**0.16**	**No data**
2025	NDSI	**0.41**	**No data**
2026	NDSI	**0.65**	**No data**

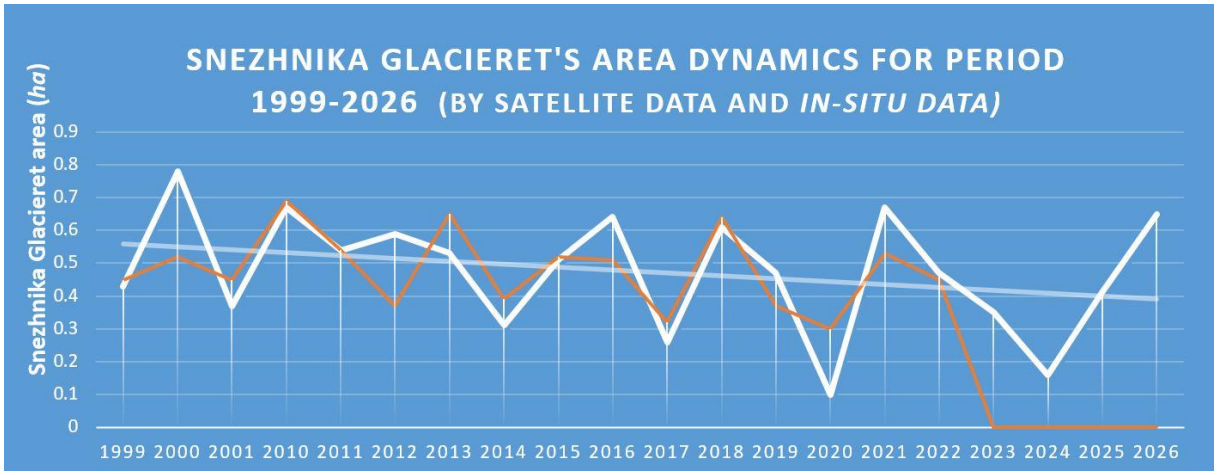


Fig. 10. Graph with calculated areas by satellite data and field measurement

The Pearson correlation coefficient between the two datasets: the Snezhnika glacieret area sizes obtained by applied methodology using satellite data and those obtained by the field measurements is **0.74** (Table 2 and Fig.10) which indicates a strong positive linear relationship between. Based on satellite data for the selected time period, a slight downward trend is observed in the area covered by snow and firn, with the maintaining an average extent of 0.5 ha.

Conclusion

The results obtained from the monitoring of the Snezhnika glacieret using satellite data, along with a comparative analysis with the field measurements, demonstrate a high degree of correlation (0.74). The use and application of optical satellite data, combined with the methodology proposed by the authors, prove to be highly effective, reliable, and accurate for conducting this type of research and addressing such tasks and problems.

References:

1. Grunewald and Scheithauer, 2010 Grunewald, K., & Scheithauer, J. (2010). Europe's southernmost glaciers: Response and adaptation to climate change. Journal of Glaciology, 56(195), 129–142. https://doi.org/10.3189/002214310791190947.
2. Gachev, E., Stoyanov, K., & Gikov, A. (2016). Small glaciers on the Balkan Peninsula: State and changes in the last several years. Quaternary International, 415, 33–54. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.042.
3. Gachev, E., & Mitkov, I. (2019). Small glaciers in Pirin (Bulgaria) and Durmitor (Montenegro) as glacio-karstic features. Similarities and differences in their recent behavior. Quaternary International, 504, 153–170. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.03.032.;
4. Gachev, E. (2022). Response of very small glaciers to climate variations and change: Examples from the Pirin Mountains, Bulgaria. Atmosphere, 13(6), 859. https://doi.org/10.3390/atmos13060859
5. Gachev, E. (2017). High mountain relief in marble in Pirin Mountains, Bulgaria: Structure, specifics and evolution. Revista de Geomorfologie, 19, 118–135. https://doi.org/10.21094/rg.2017.012.
6. Georgieva, G., Tzankov, C., & Kisyov, A. (2022). Geophysical measurements of the southernmost microglacier in Europe suggest permafrost occurrence in the Pirin Mountains (Bulgaria). The Cryosphere, 16, 4847–4863. https://doi.org/10.5194/tc-16-4847-2022.
7. Dozier, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing of Environment, 28, 9–22. https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6.
8. https://earthexplorer.usgs.gov/
9. https://www.usgs.gov/landsat-missions/
10. https://dataspace.copernicus.eu/
11. https://www.planet.com/explorer/
12. Hall, D.K. and Riggs, G.A., “Normalized-Difference Snow Index (NDSI) in Encyclopedia of Earth Sciences, Encylopedia of Snow, Ice and Glaciers”,779–780, 2011.
13. Aybar, Cesar and Contreras, Julio and Donike, Simon and Portalés-Julià, Enrique and Mateo-García, Gonzalo and Gómez-Chova, Luis, A Radiometrically and Spatially Consistent Super-Resolution Framework for Sentinel-2
14. https://medium.com/@ya_71389/sentinel-2-deep-resolution-3-0-c71a601a2253

THERMAL AND SPECTRAL MAPPING OF DECEPTION ISLAND, ANTARCTICA

Temenuzhka Spasova[1], Miroslav Y. Tsvetkov[2], Adlin Dancheva[1], Nadya Yanakieva[1], Andrey Stoyanov[1]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Nikola Vaptsarov Naval Academy (Bulgaria)
e-mail: tspasova@space.bas.bg; m.tsvetkov@nvna.eu

Keywords: *Deception Island, Antarctica, remote sensing, Sentinel-2, Sentinel-3, LST, mosses, lichens*

Abstract: *Deception Island, located in the South Shetland Islands archipelago, Antarctica, is a unique volcanic territory characterized by complex relief, geothermal activity, diverse surface substrates and specific climatic conditions. The spatial heterogeneity of the earth's surface and the presence of sparse vegetation, represented mainly by mosses and lichens, create prerequisites for the formation of various thermal and spectral characteristics.*

The aim of this study is to analyze the spatial distribution of the Earth's surface temperature and the spectral characteristics of different types of surfaces on Deception Island by integrating satellite data and ground-based measurements. Data from Sentinel-2 MSI were used to calculate the spectral indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), MCARI2 (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 2), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) and NDSI (Normalized Difference Snow Index). Land Surface Temperature (LST) data from Sentinel-3 Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) were used to assess thermal performance. Satellite observations are complemented by field measurements carried out with the HT-19 infrared thermal camera to determine the local surface temperature and with the Sekonic C-800 spectrometer to characterize light conditions in the visible spectral range (380–780 nm).

The methodological approach includes spatial analysis of the thermal and spectral characteristics of volcanic substrates, areas with sparse vegetation cover, and surfaces occupied by mosses and lichens. Particular attention is paid to the possibilities for distinguishing vegetation from bare volcanic surfaces by means of spectral indices, as well as to the assessment of local temperature variability by field infrared thermography. The analysis takes into account the differences in the spatial resolution of satellite and ground-based observations and the limitations in their comparison.

The study proposes an integrated approach for thermal and spectral characterization of Antarctic volcanic territories and for evaluating the applicability of satellite and field methods in monitoring surface characteristics and vegetation cover in polar regions.

ТЕРМАЛНО И СПЕКТРАЛНО КАРТОГРАФИРАНЕ НА ОСТРОВ ДИСЕПШЪН, АНТАРКТИКА

Теменужка Спасова[1], Мирослав Цветков[2], Адлин Данчева[1], Надя Янакиева[1], Андрей Стоянов[1]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Военноморско училище "Никола Вапцаров"
e-mail: tspasova@space.bas.bg; m.tsvetkov@nvna.eu

Ключови думи: *остров Дисепшън, Антарктика, дистанционни изследвания, Sentinel-2, Sentinel-3, LST, мъхове, лишеи*

Резюме: *Остров Дисепшън, разположен в архипелага Южни Шетландски острови, Антарктика, представлява уникална вулканична територия, характеризираща се със сложен релеф, геотермална активност, разнообразни повърхностни субстрати и специфични климатични условия. Пространствената неоднородност на земната повърхност и наличието на оскъдна растителност, представена основно от мъхове и лишеи, създават предпоставки за формиране на различни термални и спектрални характеристики.*

Целта на настоящото изследване е да се анализират пространственото разпределение на температурата на земната повърхност и спектралните характеристики на различни типове повърхности на остров Дисепшън чрез интегриране на спътникови данни и наземни измервания.

Използвани са данни от Sentinel-2 MSI за изчисляване на спектралните индекси NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), MCARI2 (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 2), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), NDWI (Normalized Difference Water Index) и NDSI (Normalized Difference Snow Index). За оценка на термалните характеристики са използвани данни за температурата на земната повърхност (Land Surface Temperature – LST) от Sentinel-3 Радиометър за температура на морската и земната повърхност (SLSTR). Спътниковите наблюдения са допълнени с теренни измервания, извършени с инфрачервена термокамера HT-19 за определяне на локалната повърхностна температура и със спектрометър Sekonic C-800 за характеризиране на светлинните условия във видимия спектрален диапазон (380–780 nm).

Методологичният подход включва пространствен анализ на термалните и спектралните характеристики на вулканичните субстрати, участъците с оскъдно растително покритие и повърхностите, заети от мъхове и лишеи. Особено внимание се отделя на възможностите за разграничаване на растителността от оголените вулканични повърхности чрез спектрални индекси, както и на оценката на локалната температурна изменчивост чрез теренна инфрачервена термография. Анализът отчита различията в пространствената разделителна способност на спътниковите и наземните наблюдения и ограниченията при тяхното съпоставяне.

Изследването предлага интегриран подход за термално и спектрално характеризиране на антарктически вулканични територии и за оценка на приложимостта на спътниковите и теренните методи при мониторинг на повърхностните характеристики и растителното покритие в полярните области.

Introduction

Deception Island is a volcanically active, horseshoe-shaped island enclosing Port Foster in the Bransfield Strait. Its most recent historical eruptions occurred in 1967, 1969 and 1970. The combination of volcanic deposits, geothermal manifestations, snow and ice, and highly variable maritime weather produces a complex surface thermal environment. Prior field work has demonstrated that geothermal influence can strongly affect near-surface ground conditions over limited distances [1], while geological and photogrammetric studies provide an important spatial framework for interpreting volcanic landforms [2].

Satellite observations offer spatial context for regional mapping, whereas handheld thermal instruments can resolve fine-scale heterogeneity that is not visible at satellite thermal resolution. However, an apparent thermal hotspot may also reflect differences in insolation, substrate emissivity, wetness, topographic orientation or acquisition time. Likewise, optical spectral contrasts can reflect lithology, grain size, weathering, snow and moisture rather than thermal activity alone. Integrating both sources with terrain information therefore requires careful co-registration and explicit uncertainty assessment.

The aim of this study is to analyze the spatial distribution of the Earth's surface temperature and spectral characteristics of Deception Island through the integrated use of data from Sentinel-2 MSI, Sentinel-3 SLSTR [3] and field measurements. The study includes the calculation and analysis of the spectral indices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 2 (MCARI2), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI), characterization of regional temperature conditions by Land Surface Temperature (LST), and assessment of local temperature variability by infrared thermography with HT-19 [4]. Additional measurements with the Sekonic C-800 [5] are used to describe the recorded light conditions in the visible spectral range. The main attention is paid to the spatial differences between volcanic substrates, vegetation-cover areas and snow surfaces, as well as to the possibilities and limitations of the integrated spectral-thermal approach for monitoring Antarctic volcanic territories.

Materials and Methods

Study Area

The study was conducted in Whalers Bay, Port Foster, Deception Island, located in the South Shetland Islands, Maritime Antarctica. Deception Island is an active volcanic caldera characterized by a distinctive horseshoe shape, with its central depression occupied by Port Foster. The area is characterized by diverse volcanic substrates, including volcanic ash, pyroclastic deposits, and rock formations, as well as localized geothermal activity (Fig. 1, 2).

Whalers Bay is situated within the volcanic caldera and exhibits distinctive thermal and spectral surface characteristics influenced by volcanic substrates, coastal environmental conditions, and heterogeneous land cover. Local vegetation communities, including mosses and lichens, occur on suitable natural and anthropogenic substrates.



Fig. 1. Deception Island, Antarctica, 17 March 2023 [6]

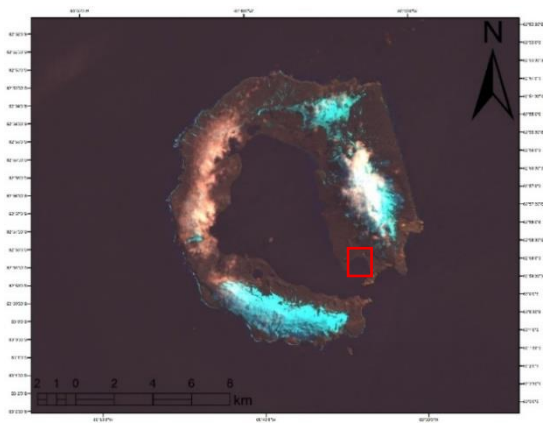


Fig. 2. Whaler's Bay, Port Foster, Deception Island, bands:11,8,3;ESA [3]

Field observations included surface temperature measurements using an HT-19 infrared thermal camera and visible-light measurements performed with a Sekonic C-800 spectrometer. The investigated sites were used to characterize local thermal and light variability and to complement the spatial analysis of Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 SLSTR satellite data.

Data and Methods

The satellite data used in the study are from the Sentinel -2B and Sentinel-3B satellites of the European Space Agency (ESA) [3], (Table 1).

Table 1. Satellite image and mobile thermal camera acquisition dates

Satellite	Date	Spectral Band, wavelength	Band	GSD*, m
Sentinel-2B	30 January 2026	0.56 μm	3	10
		0.665 μm	4	10
		0.842 μm	8	10
		0.865 μm	8a	20
		1.61 μm	11	20
Sentinel-3B	30 January 2026	3.74 μm	S7	1000
		10.85 μm	S8	1000
		12 μm	S9	1000
HT-19 thermal camera	04 February 2026	8 to 14 μm	Infrared	320 x 240 pixels
Sekonic C-800	04 February 2026	380 to 780 nm	visible	1 nm

**Ground sample distance (GSD)*

The HT-19 mobile thermal camera was used during field measurements. Operating in the 8–14 μm spectral range with a measurement accuracy of ±2°C, it offers five color palette options (Rainbow, Iron Red, Cold Color, Black & White, White & Black). This enhances the visualization and interpretation of data by effectively integrating surface temperature readings with real-time thermal imaging. The Iron Red color scale palette was selected for the study and the measured parameters are the maximum and minimum values of the ground temperature. The display also displays the Central point temperature, which was taken into account when assessing the snow condition [7], Table 1.

The field spectral surveys were performed using a spectrometer in the visible range (Sekonic Spectrometer C-800), a full-spectrum color meter that can accurately measure any type of light. The data from the spectrometer is with the following parameters: Color temperature, CCT (Correlated Color Temperature), Δuv (Deviation) between the correlated color temperature and the place of emission of the black body, Hue (in degrees), Sat – Saturation is the index to express the intensity or chroma.

Using these data, a study of the color characteristics of the objects was conducted. For each spectral reflectance characteristic (SRC), the color characteristics (color coordinates (x, y) and dominant wavelength) in the spectral range 380–780 nm were calculated relative to CIE 1931 and a standard source of electromagnetic radiation [7, 8].

To map and characterize the spectral properties of the land surface on Deception Island, Antarctica, several spectral indices were calculated using Sentinel-2 MSI optical data. These indices were applied to distinguish vegetation-covered areas, exposed volcanic substrates, and snow-covered surfaces, as well as to assess spatial variations in surface characteristics. The selected spectral indices and their corresponding mathematical formulas are presented in Table 2.

Table 2. Calculation formulas and description of the optical indices used in the study

Spectral index	Formula	Sentinel-2 bands	Reference
NDVI	(1) NDVI = (B8 − B4) / (B8 + B4)	B8, B4	Rouse et al. (1974) [9]
MCARI2	(2) MCARI2 = 1.5 × [2.5 × (B8 − B4) − 1.3 × (B8 − B3)] / √[(2 × B8 + 1)² − (6 × B8 − 5 × √B4) − 0.5]	B8, B4, B3	Haboudane et al. (2004) [10]
SAVI	(3) SAVI = (1 + L) × (B8 − B4) / (B8 + B4 + L); L = 0.5	B8, B4	Huete (1988) [11]
NDWI	(4) NDWI = (B8A − B11) / (B8A + B11)	B8A, B11	Gao (1996) [12]

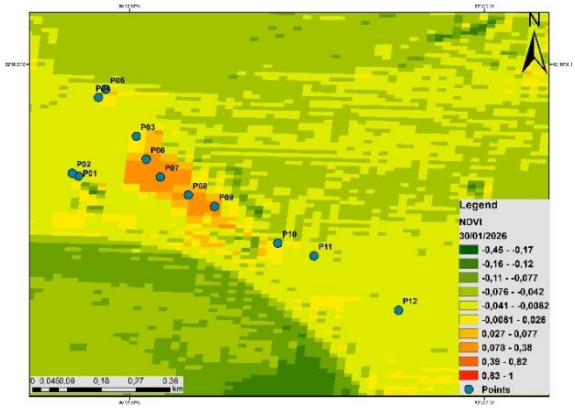
Results

At points 6 to 9, the highest values are observed in the spectral indices NDVI, MCARI2, SAVI and NDWI (Fig. 3). The rectangular area highlighted on the map indicates the common area of interest used for extracting the surface profiles (Fig. 2).

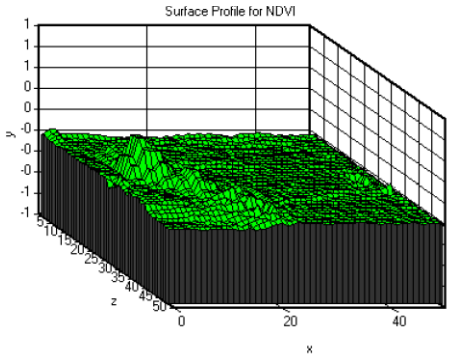
Sampling point P07 exhibited the highest MCARI2 value (0.459) among the investigated locations, accompanied by elevated NDVI (0,26), SAVI (0.390), and NDWI (0.123) values. The agreement among these four spectral indices suggests a comparatively strong vegetation-related spectral response associated with potentially higher surface moisture.

This pattern is consistent with the possible presence of a relatively well-developed moss-covered microsite within the volcanic landscape of Whalers Bay, Deception Island. The elevated MCARI2 value further supports the vegetation-related interpretation, although it cannot independently establish chlorophyll concentration or photosynthetic activity.

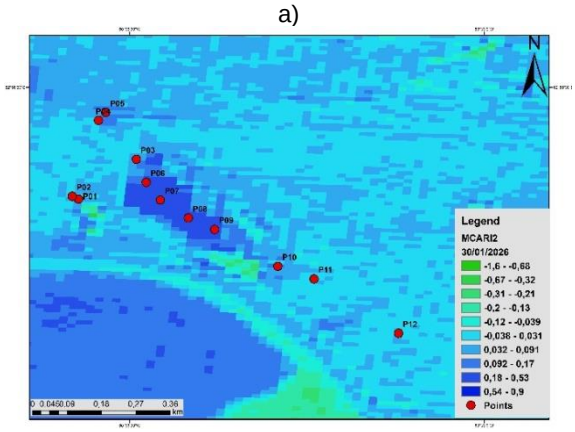
The combined spectral response identifies P07 as a priority location for further investigation of moss cover, moisture conditions, and vegetation physiological status.



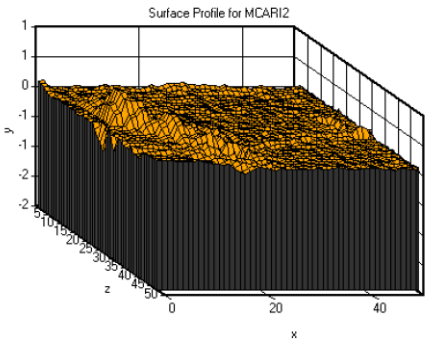
a)



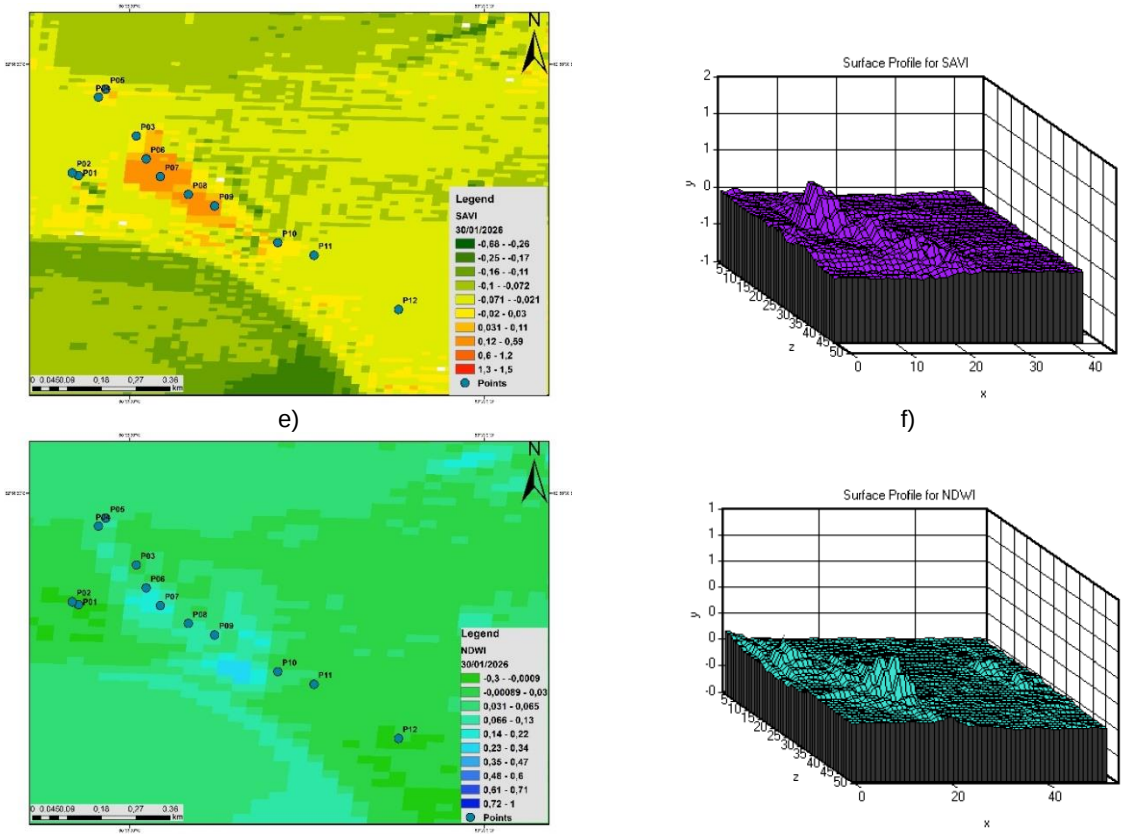
b)



c)



d)

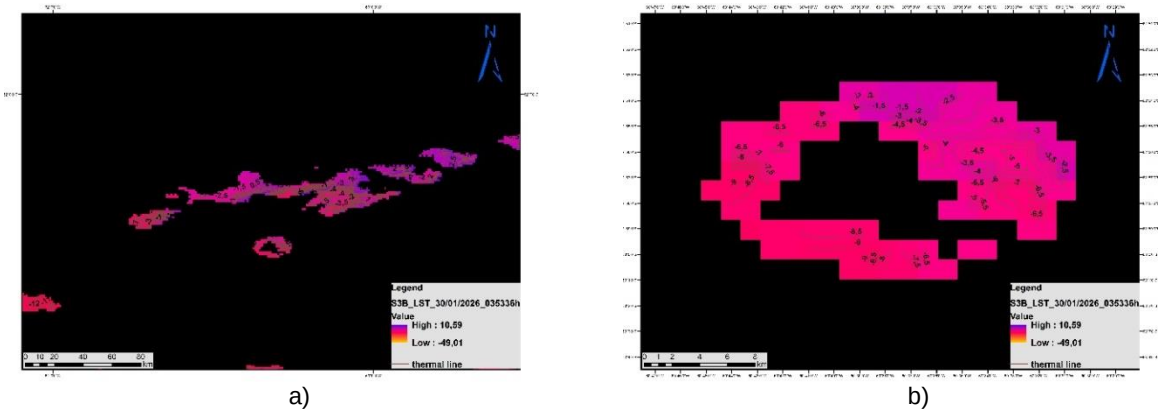


e) f)

g) h)

Fig. 3 (a–h). Spatial distribution with field points and corresponding three-dimensional surface profiles of (a) NDVI, (b) surface profile for NDVI, (c) MCARI2, (d) surface profile for MCARI2, (e) SAVI, (f) surface profile for SAVI, (g) NDWI and (h) surface profile for NDWI in Whalers Bay, Deception Island, derived from Sentinel-2 MSI imagery acquired on 30 January 2026

Sentinel-3 LST data acquired on 30 January 2026 indicated temperatures ranging from −5°C to −3,5°C in the area containing P7 (Fig. 4). Sentinel-2 spectral indices were derived from imagery acquired on the same date, enabling a temporally consistent comparison of optical and thermal satellite observations, although their acquisition times and spatial resolutions differ.

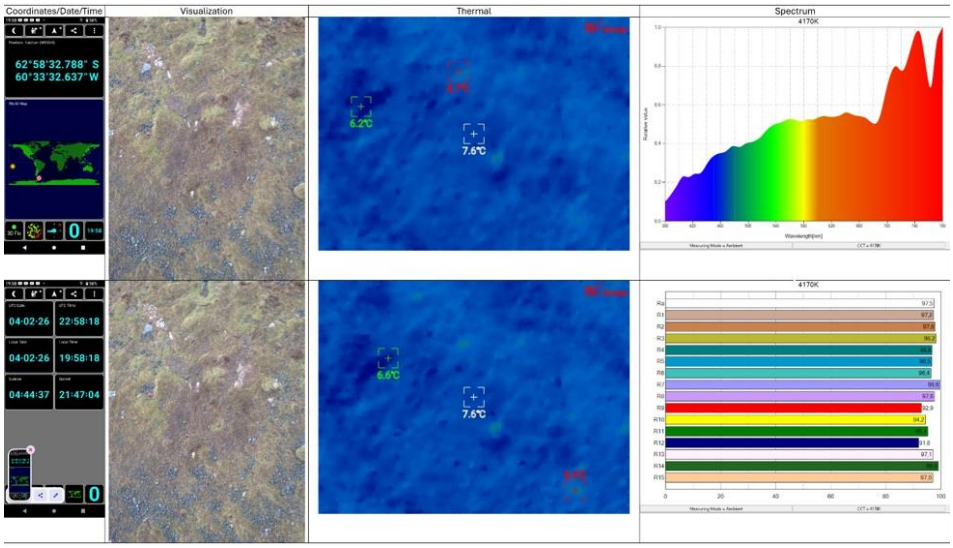


a) b)

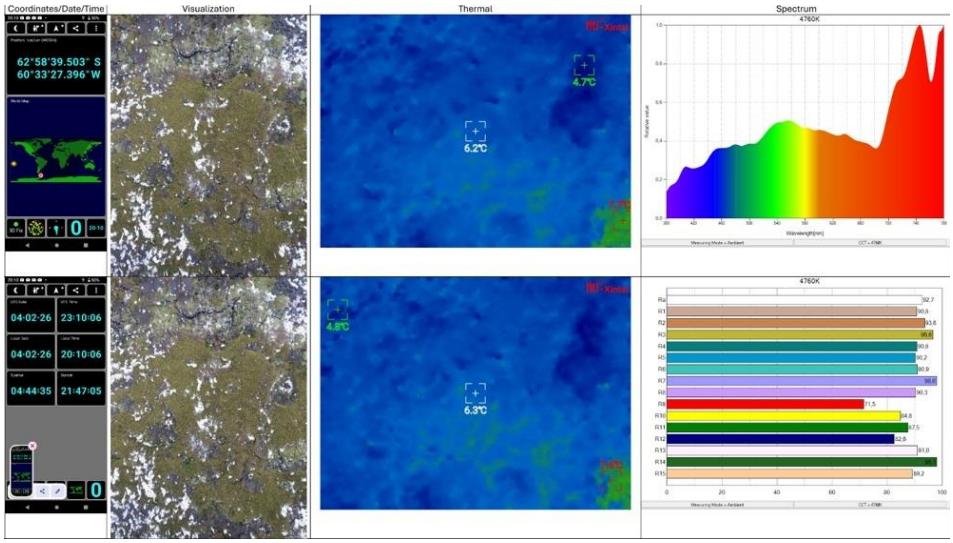
Fig. 4. (a)Thermal map of South Shetland Islands, Sentinel 3B, 30/01/2026, (b)Thermal map of Deception Island Sentinel 3B, 30/01/2026

The Fig. 5 presents GPS coordinates and acquisition metadata (left), visible-light images of the investigated surface (centre-left), corresponding thermal images with selected temperature readings (centre), and the measured spectral power distribution and colour-rendering parameters of ambient illumination (right) and the recorded correlated colour temperature (CCT) in Kelvin [K].

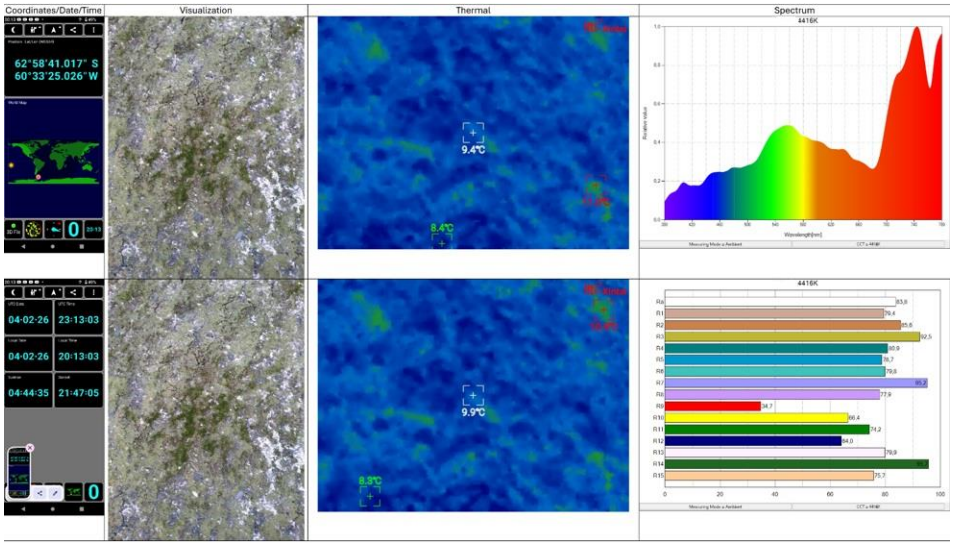
Field-based thermal measurements conducted on 4 February 2026 indicated local temperature readings of approximately 7–8°C (Fig. 5, Table 3). These observations suggest substantial differences between the regional satellite-derived thermal conditions and the localized field measurements.



a) Field profile 04



b) Field profile 07



c) Field profile 08

Fig. 5 (a–c). Field observations of moss-covered volcanic terrain at Whalers Bay, Deception Island, Antarctica (4 February 2026). Autor: prof. Miroslav Tsvetkov.

Table 3. Geographic coordinates of the investigated sampling profiles and results of thermal camera measurements (surface temperature, °C) and spectrometric measurements (Correlated colour temperature, CCT, K) at Whalers Bay, Deception Island, Antarctica (4 February 2026). Autor: prof. Miroslav Tsvetkov

Points	Time	Latitude (S)	Longitude (W)	Termal camera, [°C]	CCT, [K]
P01	19:42	62°58′39.425″	60°33′34.322″	8.7	5825
P02	19:46	62°58′39.196″	60°33′34.858″	9.3	4815
P03	19:51	62°58′36.068″	60°33′29.428″	6.1	4424
P04	19:58	62°58′32.788″	60°33′32.637″	7.6	4479
P05	20:02	62°58′32.110″	60°33′32.022″	7.9	4355
P06	20:07	62°58′38.016″	60°33′28.599″	7.9	4334
P07	20:10	62°58′39.503″	60°33′27.396″	6.2	4760
P08	20:13	62°58′41.017″	60°33′25.026″	9.4	4416
P09	20:15	62°58′41.986″	60°33′22.800″	8.7	4550
P10	20:20	62°58′45.089″	60°33′17.458″	7.3	4058
P11	20:25	62°58′46.155″	60°33′14.386″	7	5088
P12	20:35	62°58′50.742″	60°33′07.247″	7.5	4825

Spectral curves show a relatively low intensity in the blue part, a gradual increase towards the green and yellow parts, and pronounced fluctuations in the red part of the visible spectrum (Fig. 5).

The Correlated Color Temperature (CCT) is approximately 4660 K on average for the 12 points (Table 3). It characterizes the color of the recorded lighting, not the temperature of the plant or the volcanic surface. These values are measured at the end of the day, which can be seen from the GPS data. Although the survey was done in February, when the so-called white nights are observed for the area. The field spectrometer data provides important information that complements and enriches the satellite data [13]. The Color Rendering Index (CRI) and the data for the 15 colors (R1 to R15) show low values mostly for P08. The data for R9 (red) from the selected three profiles show values below 35. This means that there are no colors close to the real colors of the examined objects. The values presented in profile P08 for color rendering are no exception to the rest, but they are one of the lowest, and it is there that some of the highest values with P07 for spectral indices are available.

All the parameters examined by the spectrometer can complement and upgrade the information not only about mosses and lichens, but also about any other object, as long as we know the spectral curve of the object under study well enough. Information from spectrometric data does not replace the use of satellite data (optical or radar), as it is about different spatial resolutions. This information helps with the integrated approach, as it enriches the momentary information, which may not coincide with the temporal and spatial resolution of the satellites [13].

Chlorophyll strongly absorbs light in the blue and red areas. These areas are present in the measured curve, but it does not prove chlorophyll absorption because the Sekonic C-800 measures the spectral distribution of light and not directly the reflection or fluorescence of the plant.

The combined findings identify P07 as a potentially important moss-covered microsite for investigating relationships between vegetation-related spectral responses, surface moisture and thermal conditions in the volcanic environment of Deception Island.

Conclusions

The integration of Sentinel-2 spectral indices, Sentinel-3 land surface temperature data, and ground-based thermal and spectral observations provides complementary information on the environmental characteristics of Whalers Bay, Deception Island, Antarctica.

Among the twelve investigated sampling locations, point P07 was characterized by elevated NDVI, SAVI, and NDWI values and the highest MCARI2 value. This combined spectral response is consistent with the potential presence of a relatively well-developed moss-covered surface associated with increased moisture availability.

Sentinel-3 observations acquired on 30 January 2026 indicated regional land surface temperatures ranging from −5°C to −3,5°C, while localized thermal measurements conducted on 4 February 2026 recorded temperatures of approximately 7–8°C. These differences highlight the spatial and temporal variability of thermal conditions in the investigated volcanic environment. However, they cannot independently establish geothermal influence or persistent surface warming.

Field spectrometric measurements provided additional information on illumination conditions, including spectral regions relevant to chlorophyll light absorption. Nevertheless, these observations do not directly quantify chlorophyll concentration or photosynthetic activity.

Overall, the results identify P07 as a potentially important moss-covered microsite and demonstrate the value of combining optical satellite indices, regional thermal observations, and field measurements for investigating environmental heterogeneity in Antarctic volcanic landscapes. Further high-resolution spectral measurements and chlorophyll fluorescence observations are required to establish the physiological condition of the vegetation and its relationship with moisture and temperature.

Acknowledgements

This work was supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science in connection with the execution of a contract with № 70-25-144 | 29.06.2026 - "Spectral analysis and measurement of chlorophyll fluorescence of mosses and lichens in the Arctic and Antarctic", National Polar Program 2025.

References:

1. Goyanes, G., Vieira, G., Caselli, A., Cardoso, M., Marmy, A., Santos, F., Bernardo, I., & Hauck, C. (2014). Local influences of geothermal anomalies on permafrost distribution in an active volcanic island (Deception Island, Antarctica). Geomorphology, 225, 57–68. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.010.
2. Prates, G., Torrecillas, C., Berrocoso, M., Goyanes, G., & Vieira, G. (2023). Deception Island 1967–1970 Volcano Eruptions from Historical Aerial Frames and Satellite Imagery (Antarctic Peninsula). Remote Sensing, 15(8), 2052. https://doi.org/10.3390/rs15082052
3. https://dataspace.copernicus.eu/
4. https://hti-instrument.com/pages/ht-19-manual?srsltid=AYCX9vJ70DGFxBR3od75OdKDV5Fg2VKzAlmtrHl3f5FH-sHik9utGfVA
5. https://global.sekonic.com/sekonic-c-800-spectrometer/
6. https://eu-space.europa.eu/components/earth-observation-copernicus/image-of-the-day/deception-island
7. Spasova, T.; Avetisyan, D.; Stoyanov, A. Snow Cover Mapping Based on a Multi-Index Technique in Vitosha, Pirin and Rila mountains. In Proceedings of the SPIE 13197, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XV, 131971B, Edinburgh, UK, 16–20 September 2024. https://doi.org/10.1117/12.3031481
8. Temenuzhka Spasova and Daniela Avetisyan "A synchronized remote sensing monitoring approach in the Livingstone island region of Antarctica", Proc. SPIE 12786, Ninth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2023), 127861X (21 September 2023); https://doi.org/10.1117/12.2682162
9. Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, Vol. 1, 309–317
10. Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. Remote Sensing of Environment, 90(3), 337–352. DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.013
11. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
12. Gao, B.-C. (1996). NDWI A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58(3), 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
13. Stoyanov, A.; Spasova, T.; Avetisyan, D. An Analysis of Powder, Hard-Packed, and Wet Snow in High Mountain Areas Based on SAR, Optical Data, and In Situ Data. Remote Sens. 2025, 17, 1649. https://doi.org/10.3390/rs17091649

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

LUNAR EXOGENIC PROCESSES POSING HAZARDS TO LONG-TERM LUNAR INFRASTRUCTURE

Iskren Ivanov, Lachezar Filchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: iso.ivanov@space.bas.bg, lachezarhf@space.bas.bg

Keywords: *Lunar environment, Exogenic processes, Environmental hazards, Impact cratering, Space radiation, Electrostatic dust mobilization, Lunar thermal dynamics*

Abstract: *Humanity's transition from short-duration lunar sorties to the establishment of a continuous human presence on the lunar surface in the context of NASA's Artemis program, the International Lunar Research Station (ILRS), and ESA's Argonaut lunar lander program requires ensuring long-term operational reliability within the harsh lunar environment. This review paper consolidates into a unified framework the numerous exogenous hazards identified to date by the aerospace community. It analyzes ongoing impact cratering processes, their morphological features and mechanisms, cosmic ray flux, electrostatic regolith mobilization, and drastic diurnal temperature swings. Ultimately, this review details the specific risks and structural impacts that these phenomena pose to lunar infrastructure and instrumentation.*

ЛУННИ ЕКЗОГЕННИ ПРОЦЕСИ СЪЗДАВАЩИ ОПАСНОСТИ ЗА ДЪЛГОСРОЧНАТА ЛУННА ИНФРАСТРУКТУРА

Искрен Иванов, Лъчезар Филчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: iso.ivanov@space.bas.bg, lachezarhf@space.bas.bg

Ключови думи: *Лунна среда, Екзогенни процеси, Опасности, Образуване на ударни кратери, Космическа радиация, Електростатична мобилизация на прах, Лунна температурна амплитуда*

Резюме: *Преходът на човечеството от кратковременни мисии до Луната към установяването на постоянно човешко присъствие на лунната повърхност – в контекста на програма „Артемида" (Artemis) на NASA, Международната лунна изследователска станция (ILRS) и програмата за лунни спускаеми апарати Argonaut на ESA – налага да се гарантира дългосрочната надеждност на системите в суровата лунна среда. Настоящият обзорен доклад консолидира в единна рамка множеството екзогенни опасности на лунната среда, идентифицирани до момента от аерокосмическата общност. В него са анализирани текущите процеси на образуване на ударни кратери, техните морфоложки особености и механизми, потокът от космически лъчи, електростатичната мобилизация на реголита, както и драстичните денонощни температурни амплитуди. Посочени са конкретните рискове за лунната инфраструктура и апаратура, както и последствията от тях.*

Introduction

Humanity's contemporary return to the Moon represents a major operational transition from the transient, short-duration sorties of the mid-20th century Apollo era to a long-duration and sustainable infrastructure footprint [1]. While the legacy of the Apollo and Luna programs demonstrated the fundamental feasibility of lunar transit, orbital descent, landing, and surface operations, their limited mission profiles masked the cumulative, long-term degradation mechanics driven by the lunar environment. Specifically, the lunar exogenic surface processes external forces that shape the landscape in the absence of atmospheric or magnetospheric buffering pose severe operational challenges to long-term infrastructure and operations. Today, major international initiatives are driving toward this long-term presence. These include NASA's Artemis architecture for sustainable habitation, the International Lunar Research Station

(ILRS) targeting extensive surface networks, and the European Space Agency's (ESA) Argonaut lunar lander program providing heavy logistics delivery. This array of planned engineering infrastructure must endure, adapt, and operate within the lunar harsh exogenic environment. To support this collaborative international framework, this review consolidates the primary environmental hazards currently identified by the aerospace community into a concise, unified overview, as summarized in Table 1.

Table 1: Lunar Exogenic Hazards and Engineering Infrastructure Risks

Hazard Category	Exogenic Mechanism	Environmental Parameter	Engineering Risk & Infrastructure Impact
1. Impact Cratering	Micro-impact bombardment	~ 1.4 metric tons day^{-1} global mass influx; velocities ~ 9 km s^{-1}	Surface micro-pitting, shock-induced melting, and long-term erosion of exposed structural alloys.
1. Impact Cratering	Small & macro impacts	~ 180 annual primary craters with diameters D ≥ 10 m	High-energy kinetic events leading to catastrophic structural failure.
2. Geotechnical Risks	Regolith overturn	Regolith mixing depth of top 2 cm over a timescale of 81,000 years	Regolith accumulation, structural burial, and secondary low-velocity ejecta bombardment.
2. Geotechnical Risks	Substrate heterogeneity	Simple craters (D < 15 km) featuring interior unstratified breccia lenses	Lateral variations in substrate density driving differential foundation settling.
2. Geotechnical Risks	Seismic slumping	Complex craters (D > 20 km) with terraced walls; multiring basin faults (D ≥ 410 km)	Seismic displacement, mass-wasting events, and structural fatigue from seismic wave propagation.
2. Geotechnical Risks	Asymmetric ejecta flux	Oblique trajectories with impact angles < 6° relative to the horizontal	Asymmetric kinetic loading and focused directional hypervelocity ejecta streams requiring targeted shielding.
3. Radiation & Plasma Charging	Space radiation influx	Continuous unattenuated ion, proton, and heavy nucleus energy spectra	Total Ionizing Dose (TID) degradation and Single-Event Effects (SEEs) within avionics.
3. Radiation & Plasma Charging	Electrostatic discharge	Microsecond-scale transient current pulses driven by rapid dielectric charge decay	High-amplitude ESD-induced EMI coupling into shielding seams, causing component latch-up or gate breakdown.
3. Radiation & Plasma Charging	Hemispheric divergence	Unshielded farside solar wind plasma velocities anchoring at ~ 400 km s^{-1}	Accelerated dielectric charging and accelerated cumulative dose metrics for farside hardware.
4. Particulate Dynamics	Dust levitation	Terminator electric fields ≥ 40V m^{-1}; surface potentials scaling to several kilovolts (kV)	Particulate deposition on optical surfaces and photovoltaic arrays; radiator occlusion driving thermal runaway.
4. Particulate Dynamics	Triboelectric abrasion	Highly abrasive, glass-rich, comminuted regolith fragments	Triboelectric charge accumulation on dynamic interfaces, leading to sealing track degradation and solar array obscuration.
5. Thermal Dynamics	Cyclic thermal shifts	Equatorial diurnal cyclic temperatures shifting from ~ 397 K down to ~95 K	Pronounced cyclic thermal deformation inducing mechanical joint fatigue and weld micro-fracturing.
5. Thermal Dynamics	Polar deep freeze	Cryogenic thermal floor of polar PSR crater interiors consistently down to ~ 50 K	Glass transition cryo-embrittlement of elastomeric seals, lubricant freezing, and irreversible battery capacity degradation.

Materials and Methods

A systematic literature review was executed across the NASA Astrophysics Data System (ADS), Scopus, Web of Science, and Google Scholar to synthesize exogenous hazards facing long-term lunar infrastructure. The search window captured peer-reviewed baseline data and operational observations published through 2026. Search queries utilized Boolean intersections combining environmental mechanism variables ("impact cratering", "cosmic ray flux", "electrostatic regolith mobilization", "diurnal temperature") with lunar asset classes ("lunar infrastructure", "instrumentation", "habitats", "solar arrays", "radiators", "rovers"). The compiled literature was systematically structured into five distinct exogenic hazard vectors based on their physical mechanisms and targeted infrastructure systems: Impact Cratering and Geotechnical Risks, Radiation and Plasma Charging, Particulate Dynamics, and Thermal Dynamics.

Impact Cratering

Impact cratering is a major exogenic mechanism driving large-scale structural disruption, landscape degradation, and mechanical reorganization of the lunar crust. Lunar impact structures span a continuous spatial spectrum from 0.1 μm microcraters to the South Pole–Aitken (SPA) basin exceeding 2000 km in diameter [2]. For the purposes of this review, impact features are classified into three operational scales micro, small, and macro which correspond directly to crater dimensions.

Micro-Impacts

In interplanetary space, moving solid natural objects with a size spanning from 2 mm to 1 m are categorized as meteoroids, whereas the smaller sub-population restricted to dimensions below 2 mm represents micrometeoroids [3]. As projectile dimensions decrease, the corresponding impact flux increases. On planetary bodies lacking an atmosphere, such as the Moon, this continuous influx of hypervelocity particles presents the dominant threat to anthropogenic surface assets, delivering a contemporary mass flux calculated at approximately 1.4 tons per day [4]. Because there is no atmospheric column to ablate this incoming debris, these projectiles strike infrastructure entirely unimpeded, subjecting solar arrays, pressure vessels, and optical components to relentless particulate pitting [5].

The localized physical reaction of engineered materials or native substrates to microscale strikes depends on target material density and shock impedance (4, 6, 7). At highly elevated energy thresholds, hypervelocity micro-impacts drive target shock melting, vaporization, and complete ionization, generating transient, reactive plasma columns directly above the impact zone [4, 8]. On solid materials (bedrock, metals, ceramics), these impactors produce distinct microcraters defined by central glass-lined pits, severe shock-induced fracturing, localized spallation zones and high-albedo structural halos [7]. Over multi-decade timelines, this causes micro-scale mechanical abrasion and structural degradation of exposed anchors, seals, and structural alloys. Due to orbital flux geometry, equatorial regions experience three to five times higher impact rates than polar regions, exposing equatorial infrastructure to significantly accelerated rates of microscale mechanical wear and surface erosion [4].

Hypervelocity projectiles encountering the Moon typically possess a characteristic velocity distribution that peaks at 9 km s^{-1} for standard asteroidal and Jupiter-family comet populations. The architectural lifespan of long-term lunar assets is strongly dictated by the latitudinal geometry of the incoming micrometeoroid flux, creating distinct vulnerability profiles for equatorial and polar installations. Conversely, while polar infrastructure benefits from this reduced cumulative flux, it is uniquely vulnerable to highly energetic, high-latitude cometary impactors arriving from the zenith at average velocities of roughly 15 km s^{-1}. Within deep polar depressions like Shackleton crater, retrograde and high-eccentricity cometary impact velocities regularly exceed 40 km s^{-1}, with the broader cosmic distribution scaling up to 70–72 km s^{-1} [4]. The mechanical hazards of lunar regolith buildup on surface infrastructure stem from its physical nature of highly jagged, glass-rich, and razor-sharp fragments shaped by billions of years of impacts. Upon accumulating on mechanical components, it acts as a highly abrasive medium that accelerates friction and mechanical wear. This deposition induces the failure of seals and mating interfaces, compromises thermal management systems, and drives the degradation and obscuration of solar arrays [9].

Small-Impacts and Macro Impacts

Although the flux of the impactor size spectrum decreases significantly as projectile diameters exceed 1 m, the hazard to localized engineering infrastructure increases disproportionately. Guided by the non-linear planetary scaling laws established by Holsapple (1993), these meter-scale bodies generate hypervelocity, high-energy kinetic events that typically yield final crater diameters characteristically 10 to 20 times the physical dimensions of the projectile, depending on the specific impact velocity and target regime properties [6]. Consequently, these impacts carry sufficient kinetic energy to induce catastrophic, total destruction of assets in a direct strike.

While the traditional Neukum Production Function (NPF) predicts a steady-state background production of ~ 140 impact craters with diameters ≥ 10 m annually, modern orbital observations reveal a 33% more hazardous environment [10, 11]. Multi-year before-and-after image pairs from the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) empirically detect an elevated contemporary flux of ~ 180 annual craters within this same size threshold. This active population spans up to a maximum observed diameter of 43 m a discrete, high-energy event expected only once or twice a year globally. On decadal scales, this accelerated primary bombardment drives secondary cratering processes that turn over the top two centimeters of regolith in merely 81,000 years, compounding mechanical wear and abrasion risks for long-term engineering infrastructure [11].

Extrapolated over geological periods, hypervelocity bombardment generating craters with dimensions (10–100 m) acts as the primary agent of lunar landscape degradation and surface erosion. This process gradually rounds prominent rims, fills interior depressions, and on sloped terrain drives a continuous mass-wasting mechanism. Because ballistic ejecta travels 40% farther downward, this mobilization creates a net transport of native regolith from topographic highs to gravitational lows, forcing older structures to fade into the background terrain. At a macroscopic scale, these evolving features exhibit distinct morphological variations that introduce unique geotechnical and engineering hazards [7].

Simple craters (< 15 km) feature a bowl-shaped depression with a sharp-crested rim and an internal, unstratified breccia lens accumulated via wall failure. Siting infrastructure on these unconsolidated lenses introduces high risks of differential foundation settling due to the extreme heterogeneity of the underlying shocked and impact-melted rocks. Furthermore, primary strikes blanket adjacent features with a continuous, hummocky debris field of ejecta and scoured regolith, posing threats of structural burial, mechanical abrasion, and heavy kinetic loading. Beyond this perimeter, simple craters are surrounded by extensive secondary crater fields and bright, high-albedo ray systems of pulverized ejecta. Because these rays extend several crater diameters, surface architecture positioned far outside the primary excavation zone remains vulnerable to secondary bombardment and severe dust contamination [12, 13].

As structural scales increase, complex craters (> 20 km) introduce severe engineering challenges defined by terraced walls, central peaks, and flat interior floors. Terraced walls represent unstable zones susceptible to seismic shifting and localized landslides. Concurrently, the flat interior floors are covered by irregular impact melt sheets and localized pools, inducing extreme lateral variations in substrate density and hardness that complicate excavation or drilling. At the largest scale, multiring basins (≥ 410 km) exemplified by the 930 km diameter Orientale basin with its four concentric rings present severe macro-structural risks. These systems introduce deep, crustal-scale fault networks that can propagate seismic energy and complicate safe foundation. Finally, highly oblique impacts striking at entry angles under approximately 6° deviate from these standard circular trends, yielding elongated, elliptical geometries. These occurrences pose a focused directional hazard, projecting asymmetric, “butterfly-wing” ejecta patterns that concentrate hypervelocity fragments along a specific downrange vector requiring targeted structural shielding [2, 12, 14].

Solar radiation and galactic cosmic rays

Spacecraft materials and lunar infrastructure are inevitably exposed to severe environmental stressors driven by the solar wind, solar energetic particles (SEPs), and galactic cosmic rays (GCRs). These dynamic charged particle fluxes comprising protons, electrons, and heavy ions collectively induce material degradation and radiation damage, manifesting as total ionizing dose (TID) effects, single-event effects (SEEs) within microelectronics, and spacecraft charging followed by electrostatic discharge (ESD). These phenomena degrade structural materials and compromise systemic reliability, dictating the overall operational lifespan of space missions [15].

The transient energy released during an ESD event poses severe risks to onboard electronic infrastructure. The rapid dissipation of stored charge generates high-amplitude transient currents and high-intensity electromagnetic interference (EMI) within microsecond timescales. This EMI can directly penetrate hardware enclosures or electromagnetically couple into sensitive signal lines, power distribution networks, and telemetry cables through structural gaps, slots, or shielding seams. This coupling induces false commands, component latch-ups, or catastrophic permanent damage to critical command, control, and payload electronics [15]. Furthermore, data from the Chang'e-5 and Chang'e-6 missions reveal a hemispheric divergence in solar wind interactions, indicating that approximately 25% of the total solar wind influx at the lunar nearside undergoes deceleration from ~ 400 km s^{-1} to ~ 200 km s^{-1} during crossings of the Earth’s magnetotail, whereas the farside remains exposed to the unshielded, high-velocity solar wind [16].

Electrostatic Dust Mobilization and Transport

On the lunar dayside, solar ultraviolet (UV) radiation and X-rays irradiate the regolith, eliciting photoelectron emission through the photoelectric effect, which imparts a mild positive electrostatic potential onto the surface. These emitted electrons hover in a thin, dense photoelectron sheath extending approximately 1 meter above the local terrain. On the nightside and inside permanently shadowed regions (PSRs), where solar irradiation is absent, interaction with the solar wind electron plasma drives the accumulation of a high negative charge. During solar storms or when the Moon crosses the Earth's magnetotail, this surface potential can intensify to thousands of volts [17]. At the terminator boundaries,

sharp spatial gradients in surface potential generate intense localized electric fields (exceeding 40 V m^{-1}) that can electrostatically interact with cross-boundary operational assets.

The resulting electrostatic charge levitates sub-micron and fine particles of lunar dust, causing them to migrate within a dynamic dust cloud that can coat solar panels, optical lenses, and camera shields [18]. When rovers traverse or astronauts walk on this charged, highly resistive regolith, frictional contact induces accelerated triboelectric charging. On the sunlit surface, the ambient photoelectron plasma and plasma current environment facilitate safe dissipation of this net charge. Conversely, in the dark polar regions, the charge builds up continuously on rover locomotion components and extravehicular activity (EVA) suits, posing a constant risk of electrostatic discharge (ESD) that can induce catastrophic damage in onboard electronics [19].

Thermal Dynamics of the Lunar Environment and Implications for Infrastructure

The complex and extreme lunar surface thermal environment imposes severe engineering constraints on anthropogenic infrastructure, including habitats, rovers, and photovoltaic arrays. The high-amplitude cyclic temperature shifts, which at equatorial latitudes peak at ~387–397 K (~114°C to 124°C) during the 14-diurnal-Earth-day lunar daytime and plummet to ~ 95 K (~ −178°C) during the lunar night, trigger pronounced volumetric changes through thermal expansion and contraction [20]. This thermal gradient is further exacerbated within permanently shadowed regions (PSRs), primarily inside polar crater interiors, where environmental temperatures consistently settle as low as 50 K (−223°C). Over extended deployment lifetimes, this continuous physical deformation induces structural fatigue, threatening the integrity of structural joints, accelerating the degradation of welds, and potentially leading to catastrophic mechanical failures. Over geological timescales, this diurnal cycle drives
micro-mechanical fracturing and the progressive breakdown of surface lithologies and boulders. Operational survivability during the lunar night spanning 14 Earth days presents a reciprocal engineering challenge. Subsystems must endure prolonged dark periods without dropping below critical operational temperature thresholds, beyond which mechanical seals undergo glass transition, lubricants degrade, and rechargeable cells suffer irreversible battery capacity loss [21]. When electrostatically charged fine regolith particles adhere to external surfaces and accumulate on reflective radiators or optical solar reflectors, the high-absorptance, low-albedo dust increases solar absorption, accelerating thermal degradation and compounding the risk of system-wide overheating. Furthermore, thermal management of operational systems is severely restricted by the vacuum environment, which eliminates convective heat transfer and isolates thermal radiation as the exclusive mechanism for external heat rejection [22].

Conclusion

In summary, this review demonstrates that the lunar surface is far from a geologically static and inactive environment; it is a highly volatile, interconnected environmental frontier that demands specialized, environmentally tailored engineering approaches across structural materials, electromechanical mechanisms, thermal control systems, and microelectronics. The future operational reliability of planned infrastructure envisioned under NASA's Artemis architecture, the International Lunar Research Station (ILRS), and ESA's Argonaut program will be rigorously tested by this harsh cross-section of external stressors. Enduring multi-year operations requires these systems to simultaneously withstand unattenuated hypervelocity micrometeoroid fluxes, localized macro-impact ejecta dynamics, extreme diurnal thermal cycling and sharp spatial gradients down to 50 K, ionizing radiation, electrostatic charging and subsequent discharge processes, and dynamic dust mobilization. Developing engineering solutions to tackle these interconnected degradation mechanisms represents the foundational baseline required to transform the Moon into humanity's premier deep-space laboratory. Ultimately, the operational durability metrics validated through these upcoming deployments will serve as the direct technological stepping stone for humanity's subsequent expansion toward Mars and beyond.

References:

1. National Aeronautics and Space Administration. "Moon Base user's guide: Architecture resources." "NASA Headquarters", 2026, Report No. NP-2026-04-6806-HQ.
2. Melosh, H.J. "Impact cratering." "Planetary Surface Processes. Cambridge Planetary Science", Cambridge University Press, 2011, 222–275.
3. Rubin, A.E., J.N. Grossman. "Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions." "Meteoritics & Planetary Science", 2010, 45, 114–122, doi:10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x.

4. Pokorný, P., D. Janches, M. Sarantos, J.R. Szalay, M. Horányi, D. Nesvorný, M.J. Kuchner. “Meteoroids at the Moon: Orbital properties, surface vaporization, and impact ejecta production.” “Journal of Geophysical Research: Planets”, 2019, 124, 752–778, doi:10.1029/2018JE005912.
5. Pabari, J.P., S. Nambiar, V. Shah, A. Bhardwaj. “Lunar regolith and water ice escape due to micrometeorite bombardment.” “Icarus”, 2020, 338, 113510.
6. Holsapple, K.A. “The scaling of impact processes in planetary sciences.” “Annual Review of Earth and Planetary Sciences”, 1993, 21, 333–373.
7. O'Brien, P., S. Byrne. “Degradation of the Lunar Surface by Small Impacts.” “The Planetary Science Journal”, 2022, 3(10), 235, doi:10.3847/PSJ/ac9130.
8. Cintala, M.J. “Impact-induced thermal effects in the lunar and Mercurian regoliths.” “Journal of Geophysical Research: Planets”, 1992, 97(E1), 947–973.
9. Miller, S.K. “Lunar dust and dust mitigation testing.” “In MRS Spring Meeting & Exhibit”, 2023.
10. Neukum, G., B.A. Ivanov, W.K. Hartmann. “Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system.” “Space Science Reviews”, 2001, 96(1), 55–86, doi:10.1023/A:1011989004263.
11. Speyerer, E.J., R.Z. Povilaitis, M.S. Robinson, P.C. Thomas, R.V. Wagner. “Quantifying crater production and regolith overturn on the Moon with temporal imaging.” “Nature”, 2016, 538(7624), 215–218, doi:10.1038/nature19829.
12. Melosh, H.J. “Impact cratering: A geologic process.” “Oxford University Press”, 1989.
13. McKay, D.S., G. Heiken, A. Basu, G. Blanford, S. Simon, R. Reedy, J. Papike. “The lunar regolith.” “Lunar Sourcebook”, 1991, 567, 285–356.
14. Osinski, G.R., E. Pierazzo. “Impact cratering: Processes and products.” “John Wiley & Sons”, 2013.
15. Yin, H., C. Li, C. Zhao, X. Qin, X. Lu, X. Wen, L. Shi, Q. Liu, J. Wang, H. Jia, S. Yang. “Research on Monitoring Methods for Electrostatic Discharge Pulses in Spacecraft Dielectric Materials.” “Micromachines”, 2025, 16(2), 180, doi:10.3390/mi16020180.
16. Zhang, X.H., F. Su, Y.J. Li, Z.H. Liu, J.N. Li, Y.N. Zhang, L.P. Qin, R.R. Liu, F. Man, B. Xu, W.Z. Li, Y. Wei, H.Y. He. “Deeper solar wind penetration on the Moon's farside from noble gas records.” “Nature Geoscience”, 2026, 19, 887–892, doi:10.1038/s41561-026-02042-w.
17. Halekas, J.S., G.T. Delory, R.P. Lin, T.J. Stubbs, W.M. Farrell. “Lunar surface charging during solar energetic particle events: Measurement and prediction.” “Journal of Geophysical Research: Space Physics”, 2009, 114(A5), doi:10.1029/2009JA014113.
18. Wohl, C.J., J.K. Burgess, S.P. Belbin, R.S. Pappa, C.B. Taylor, M.E. Bush, J.R. Blandino. “Lunar Dust Considerations for Vertical Solar Arrays Volume 1: Lunar Environment and Dust Interactions.” “National Aeronautics and Space Administration”, 2024, No. E-20214.
19. Phillips III, J.R., C.R. Buhler, M.R. Johansen, C.I. Calle, A.R. Dove. “Electrostatic charging of the lunar surface.” “51st International Conference on Environmental Systems (ICES)”, 2022, No. 20220003536.
20. Williams, J.P., D.A. Paige, B.T. Greenhagen, E. Sefton-Nash. “The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment.” “Icarus”, 2017, 283, 300–325, doi:10.1016/j.icarus.2016.08.012.
21. Pan, C., D. Ziviani, J.E. Braun. “Performance evaluation of a vapor-compression-cycle based heat pump system for a lunar habitat under the impact of dust deposits on the coupled radiators.” “Acta Astronautica”, 2022, 194, 22–33, doi:10.1016/j.actaastro.2022.01.040.
22. Howard, A.Z., S. Stewart. “Thermal Impacts of Lunar Dust For Rovers.” “Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop (TFAWS)”, 2024.

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

ASSESSMENT OF BIOTIC STRESS IN SPRUCE FORESTS USING REMOTE SENSING: A LITERATURE REVIEW

Mihaela Tsvetkova, Lachezar Filchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: mtsvetkova@space.bas.bg

Keywords: *Norway spruce, biotic stress,* Ips typographus*, fungal decay, remote sensing, Sentinel-2, red-edge, SWIR, time series*

Abstract: *This review synthesizes evidence on remote-sensing assessment of biotic stress in Norway spruce (*Picea abies *(L.) H. Karst.), with emphasis on* Ips typographus *and fungal wood-decay agents. Particular attention is given to the physiological chain linking predisposition, attack, host defence, hydraulic and carbon imbalance, and the subsequent spectral response. The literature indicates that bark beetle attack can alter water status, photosynthetic function and defence before pronounced crown discoloration, whereas root, butt and heartwood rots often develop chronically with weak external symptoms. Red-edge, Near-Infrared (NIR) and Short-Wave Infrared (SWIR) information, temporal trajectories and, where available, canopy temperature can therefore provide complementary evidence of stress, but none is specific to a single causal agent. Sentinel-2 is well suited to regional time-series monitoring, while Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and high-resolution satellite data support crown-level reference and validation. For chronic internal decay, multi-temporal data combined with crown structure and Airborne Laser Scanning (ALS) are more appropriate than single-date spectral classification. A suitable operational methodology should therefore combine field-confirmed disturbance stages, multitemporal spectral anomalies, climatic and stand covariates, individual-tree or stand-level spatial units, and spatially independent validation. The review proposes a stage-aware framework for distinguishing predisposition, early attack, active infestation and post-attack decline.*

ОЦЕНКА НА БИОТИЧНИЯ СТРЕС В СМЪРЧОВИ ГОРИ ЧРЕЗ ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ: ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Михаела Цветкова, Лъчезар Филчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: mtsvetkova@space.bas.bg

Ключови думи: *Норвежки смърч, биотичен стрес,* Ips typographus*, гъбно гниене, дистанционни изследвания, Sentinel-2, red-edge, SWIR, времеви серии*

Резюме: *Настоящият литературен обзор синтезира научните доказателства относно оценката на биотичния стрес при норвежкия смърч (*Picea abies *(L.) H. Karst.) чрез дистанционни изследвания, с акцент върху* Ips typographus *и гъбните причинители на дървесни гниения. Особено внимание е отделено на физиологичната последователност, свързваща предразположеността, нападението, защитните реакции на гостоприемника, нарушенията във водния и въглеродния баланс и последващия спектрален отговор. Литературните данни показват, че нападението от короядите може да предизвика промени във водния статус, фотосинтетичната функция и защитните механизми на дърветата преди появата на ясно изразено обезцветяване на короната, докато кореновите, комловите и ядровите гниения често се развиват хронично и протичат при слабо изразени външни симптоми. Поради това информацията в областта на червения край на спектъра (red-edge), близката инфрачервена област и късовълновата инфрачервена област, времевите траектории на спектралните показатели и, когато са налични, данните за температурата на короната могат да предоставят допълваща информация за наличието и развитието на стрес, но нито един от тези източници на информация не е специфичен за конкретен причинител. Sentinel-2 е особено подходящ за регионален мониторинг чрез многовременни серии от наблюдения, докато безпилотните летателни апарати (UAV) и сателитните данни с висока пространствена резолюция подпомагат референтната оценка и валидирането на ниво корона. При хронични вътрешни гниения многовременните данни, комбинирани с информация за структурата на короната и данни от въздушно лазерно сканиране (ALS),*

са по-подходящи от класификация, базирана върху еднократно спектрално наблюдение. Следователно подходящата оперативна методология трябва да интегрира потвърдени чрез полеви наблюдения етапи на развитие на увреждането, многовременни спектрални аномалии, климатични и насаждански фактори, пространствени единици на ниво отделно дърво или насаждение и пространствено независимо валидиране. Въз основа на разгледаните научни доказателства е предложена рамка, отчитаща етапа на развитие на стреса, за разграничаване на предразположеността, ранното нападение, активната инфестация и последващия упадък на дърветата.

Introduction

Forest health reflects the interaction between environmental conditions, tree physiology and biotic disturbances. Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) is sensitive to water and temperature stress, which can reduce stomatal conductance, photosynthesis and water status and weaken constitutive and induced defence mechanisms. Such physiological weakening may increase susceptibility to secondary biotic agents, while pathogens can progressively impair roots, stems or internal wood tissues. Consequently, biotic stress should be considered as a process ranging from physiological disturbance to tissue damage, crown decline and, in severe cases, tree mortality (Singh et al., 2024; Kędziora et al., 2025). Importantly, these processes differ substantially among disturbance agents. Bark beetle infestation, particularly by the European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.), may progress relatively rapidly from an inconspicuous green-attack stage to crown decline and mortality, whereas root, butt, stem and heartwood decay may develop over longer periods and remain poorly expressed in the canopy (Dalponte et al., 2022a, 2022b; Allen et al., 2022).

Remote sensing provides spatially extensive and repeated observations of forest condition, but it does not directly detect a pest or pathogen. Spectral, thermal and structural anomalies represent changes in vegetation condition and may therefore have multiple possible causes, including biotic attack, drought, heat or other environmental stressors. This causal ambiguity is particularly important during the early stages of disturbance. In bark beetle infestation, trees may remain visually green while changes in foliar biochemical properties, water status and spectral response have already occurred. Sentinel-2 studies have demonstrated the potential of red-edge, near-infrared (NIR) and shortwave-infrared (SWIR) information, particularly when combined with temporal observations, for detecting such subtle changes before pronounced crown discoloration (Abdullah et al., 2019; Huo et al., 2021; Bárta et al., 2021). In contrast, fungal decay presents a different remote-sensing challenge because internal deterioration may produce weak or delayed canopy signals.

Recent research has therefore increasingly moved from individual spectral indices towards multitemporal analysis, machine learning (ML) and multisource data integration. Satellite time series, particularly Sentinel-2, provide repeated landscape-scale observations, while UAV multispectral or hyperspectral imagery can characterize individual crowns and support targeted validation. Structural information from airborne laser scanning (ALS) and environmental variables can further improve interpretation, especially for disturbances that are not directly expressed in canopy reflectance (Dalponte et al., 2022a, 2022b; Räty et al., 2021; Ecke et al., 2022). However, the transferability of models between sites, years and disturbance stages remains a major limitation, and spatially dependent validation can lead to overestimated model performance (Kautz et al., 2024; Marvasti-Zadeh et al., 2023; Mngadi et al., 2024).

In this review, early detection refers to the identification of biotic disturbance before pronounced visible crown deterioration, whereas green attack specifically denotes the visually green stage of bark beetle infestation. The objective is to summarize and critically evaluate remote-sensing approaches for detecting and assessing biotic stress in spruce forests, with emphasis on the physiological basis of detectable responses and the complementary contribution of spectral, temporal, structural and thermal information. Particular attention is given to bark beetle infestation and fungal decay as biologically contrasting disturbance pathways, and to the integration of remote-sensing observations with field and environmental data for developing reliable and locally transferable monitoring approaches.

Physiological basis of biotic stress

From predisposition to bark beetle-induced decline

The response should be considered as a sequence rather than a single “attack signal”: climatic or site stress → reduced physiological resilience → beetle colonisation → defence activation → disruption of transport and carbon balance → crown response → mortality. Drought and heat reduce stomatal conductance and photosynthetic carbon assimilation. In conifers, water deficit can also reduce resin-based defence by lowering tissue turgor and resin pressure; this can impair the tree’s ability to repel or contain attackers (Singh et al., 2024). At low beetle population density,

I. typographus preferentially colonises weakened hosts, whereas mass attack can overcome the defence of apparently vigorous trees. Successful pioneers produce aggregation pheromones that recruit additional beetles, while associated microorganisms contribute to depletion of host defence (Singh et al., 2024).

Once colonisation is established, feeding and gallery construction in the phloem disrupt transport of assimilates and signalling compounds. The resulting hydraulic and carbon imbalance, together with continued respiration, accelerates depletion of reserves. Reduced water supply and stomatal closure constrain gas exchange; progressive dysfunction is ultimately expressed as needle pigment alteration, reduced foliage water content, defoliation and crown discoloration. Importantly, the timing of visible symptoms is variable. For *I. typographus*, crown colour change may become conspicuous months after attack, so a green crown should not be equated with physiological absence of stress (Singh et al., 2024).

This mechanism explains the remote-sensing sequence. Changes in chlorophyll and pigment balance may affect the visible and red-edge regions; changes in leaf/canopy water content affect NIR/SWIR; structural deterioration becomes increasingly important later. Red-edge observations are therefore attractive for subtle chlorophyll-related changes, while SWIR is particularly relevant to water status (Stone & Mohammed, 2017; Abdullah et al., 2019; Huo et al., 2021). However, these responses are not unique to beetle attack.



Fig. 1. Proposed physiological pathway linking predisposing climatic stress, defence impairment, I. typographus colonisation and the subsequent spectral/thermal response

Chronic fungal decay and weak external symptoms

Root, butt, stem and heartwood rots require a different conceptual model. *Heterobasidion* and *Armillaria* can develop internally and progressively degrade wood while leaving the crown comparatively functional. Consequently, the causal process may be spatially disconnected from the tissue directly observed by optical sensors (Allen et al., 2022; Dalponte et al., 2022a, b). This is why single-date greenness indices are unlikely to provide a reliable diagnostic signal.

Evidence nevertheless indicates that chronic decay can affect crown density, water relations and growth sufficiently to produce subtle remote-sensing differences. Allen et al. (2022) used UAV hyperspectral and ALS data to classify root, butt and stem rot in Norway spruce, obtaining up to 75.6% accuracy with 490-band hyperspectral imagery, although κ was only 0.24. Dalponte et al. (2022a) reported 62.0–65.5% overall accuracy for wood-decay detection using airborne hyperspectral and ALS data, while Dalponte et al. (2022b) achieved a balanced accuracy of 56.3% using three years of 3-m PlanetScope/Dove data and individual-tree crowns. The relatively modest accuracies are informative: internal decay is detectable only indirectly and requires structural and temporal context.

Thus, bark beetle attack is better represented as an acute disturbance with a potentially short pre-visual window, whereas wood decay is predominantly chronic and may require long-term trajectories. This distinction should determine both sensor selection and the target variable.

Remote-sensing methodology

Sensor selection and spatial scale

For regional monitoring, Sentinel-2 offers an effective compromise between coverage, revisit frequency and spectral configuration. Its red-edge and SWIR bands are particularly relevant to chlorophyll and water-status changes. WorldView-2 and other high-resolution satellite systems can improve crown separation (Immitzer & Atzberger, 2014), while UAV multispectral data provide flexible, high-resolution acquisitions for individual-tree validation and green-attack studies (Huo et al., 2023; Klouček et al., 2024). UAV studies should be viewed primarily as a means of capturing fine spatial and temporal reference information rather than as a replacement for regional satellite monitoring.

Thermal observations are complementary because stomatal closure reduces evaporative cooling and can increase canopy temperature. A thermal anomaly therefore provides physiological information that may precede visible discoloration, but temperature is strongly affected by radiation, air temperature, wind, humidity and acquisition time (Smigaj et al., 2024). Hyperspectral data are valuable for mechanistic research and biochemical discrimination but are less practical for routine regional monitoring.

Table 1. Relative strengths and limitations of remote-sensing approaches for assessing spruce biotic stress

Approach	Main advantage	Main limitation	Typical contribution
Sentinel-2 multispectral	Wide coverage; frequent observations; red-edge and SWIR information	10–60 m band-dependent resolution; mixed crowns	Regional monitoring and time-series analysis
High-resolution satellite	Detailed crown structure	Higher cost and/or lower temporal availability	Individual-tree and small-cluster mapping
UAV multispectral	Very high spatial resolution; flexible timing	Limited coverage; field logistics	Early green-attack detection and crown-level analysis
Hyperspectral	Fine spectral information	Large data volume; limited operational coverage	Physiological and biochemical stress discrimination
Thermal	Information on canopy temperature and water stress	Atmospheric and illumination effects	Water-stress and temperature-response assessment

Spectral indicators and time series

NDVI remains useful for describing broad canopy condition, but it can saturate in dense spruce stands and may be insensitive to weak early stress. Red-edge indices such as NDRE and chlorophyll-sensitive bands can capture changes that are less apparent in the visible domain. Moisture-sensitive NIR-SWIR combinations and NDRS have shown potential for early *I. typographus* stress detection (Huo et al., 2021). The key methodological principle, however, is not to search for a universal “bark beetle index”.

Temporal anomalies are more defensible than single-date thresholds. Bárta et al. (2021) showed that seasonal trajectories can outperform individual observations for separating healthy and green-attack spruce. A suitable workflow is therefore: (1) construct a cloud-screened seasonal Sentinel-2 time series; (2) normalize observations to phenological stage; (3) calculate red-edge, NIR and SWIR indicators; (4) derive change metrics relative to a healthy reference trajectory; and (5) combine these anomalies with climate and stand variables. This approach explicitly asks whether a tree or stand deviates from its expected seasonal behaviour.

Field reference data and spatial units

Reliable reference data are the critical bottleneck. Each observation should include species, geographic position, disturbance agent where known, infestation/decay stage, date of field assessment and, ideally, repeated observations. For bark beetles, “healthy”, “green attack”, “visible decline” and “dead/post-attack” should be separated rather than collapsed into healthy/damaged classes. For fungal decay, reference data should distinguish confirmed decay from visually healthy trees, preferably using harvest, increment boring or other pathology-based evidence.

At individual-tree scale, ITC delineation can be based on ALS/CHM or photogrammetric data and should be checked against field positions. For stand-level modelling, the sampling unit should match the intended management application. Räty et al. (2021) demonstrated that spatial validation strongly affects performance: for butt-rot mapping, pseudo-R^2 decreased from 0.60 with stand-based validation to 0.37 with spatially distinct cluster validation. This shows why random pixel splits can produce overly optimistic results when neighbouring samples are correlated.

Modelling and validation

The appropriate modelling strategy is a hierarchical one. First, identify physiological anomaly; second, classify disturbance stage; third, estimate the most likely biotic driver using field and environmental context. Random Forest, SVM and related methods can integrate spectral, temporal, topographic and stand variables, while deep learning is most useful when large labelled datasets are available (Marvasti-Zadeh et al., 2023; Mngadi et al., 2024). Model performance should be evaluated with spatially independent hold-out sites and, where possible, different years. Accuracy alone is insufficient; balanced accuracy, F1-score, sensitivity to the early-attack class and confusion between abiotic and biotic stress should also be reported.

A practical framework for spruce forests is therefore: Sentinel-2 time series for regional screening; climate variables such as precipitation, temperature and VPD to characterize predisposition; ALS/CHM or high-resolution imagery for crown structure; UAV multispectral/thermal observations for targeted validation; and field pathology/forest-health surveys for causal attribution. This reduces the risk of interpreting drought or heat stress as a bark beetle signal.



Fig. 2. Proposed methodological framework for stage-aware and spatially transferable monitoring of spruce biotic stress

Evidence across disturbance types

The literature suggests that no single sensor or indicator is optimal for all forms of biotic stress. For *I. typographus*, Sentinel-2 red-edge/SWIR time series can detect green-attack-related changes before strong discoloration (Abdullah et al., 2019; Huo et al., 2021; Bárta et al., 2021), while UAV multispectral observations increase crown-level sensitivity (Huo et al., 2023; Klouček et al., 2024). For internal wood decay, ALS and multi-temporal optical information are more important because the causal process is not directly visible in the canopy (Dalponte et al., 2022a, b; Räty et al., 2021). UAV hyperspectral data can provide higher biochemical sensitivity but require more extensive calibration and are less scalable (Allen et al., 2022).

The systematic review of UAV forest-health studies by Ecke et al. (2022) further supports the importance of flexible high-resolution acquisitions, while emphasizing that forest-health applications remain methodologically heterogeneous. Thermal remote sensing provides an additional physiological dimension, but its operational use in forest pathology is less mature than multispectral monitoring (Smigaj et al., 2024). Consequently, sensor fusion should be based on complementary physiological information rather than simply increasing the number of predictors.

Abiotic–biotic interaction and Bulgarian context

A central implication for Bulgaria is that drought and heat should be modelled as predisposing factors rather than treated as unrelated noise. Remote-sensing studies in Bulgarian forests have already demonstrated the applicability of satellite data to bark beetle disturbance and abiotic stress (Filchev, 2012, 2020; Georgiev et al., 2022). However, mountain spruce forests differ from Central and Northern European study sites in elevation, terrain, stand structure and disturbance history. Transferability must therefore be tested rather than assumed.

For Bulgarian monitoring, the strongest design is a multi-site dataset containing healthy reference stands, documented *I. typographus* attacks and, where available, stands with fungal decay. Sentinel-2 should provide the common temporal backbone, while UAV/high-resolution data should be collected at selected plots to support crown-level reference. Climate and topographic variables should be incorporated before classification so that spectral anomalies are interpreted in their environmental context.

Research gaps and proposed framework

Three gaps are particularly important. First, many studies still use labels such as “healthy” and “damaged”, although physiological development is stage-dependent. Second, chronic internal decay is underrepresented relative to insect damage and visible crown decline. Third, reported accuracy is often based on within-site validation and therefore may not reflect transferability.

A robust research framework should consequently define four stages: (1) predisposition/physiological stress, (2) early or green attack, (3) active visible decline, and (4) post-attack mortality or chronic decay. Each stage should be represented by field observations and linked to a corresponding remote-sensing feature set. Sentinel-2 time-series anomalies should form the core regional predictor set, supplemented by red-edge/SWIR indices, climate variables and stand structure. High-resolution or UAV data should be used to refine individual-tree interpretation and validate the satellite signal. Spatially independent and cross-site validation should be mandatory.

Spatially independent validation should be treated as a methodological requirement rather than an optional improvement. Models should preferably be tested using spatially separated stands and, where sufficient data exist, across different years or study regions. Reference datasets should record not only whether a tree is affected, but also the disturbance agent, development stage, observation date and spatial unit of analysis. A resulting framework can therefore follow a hierarchical logic: first identify an abnormal physiological trajectory, then determine its disturbance stage, and finally assess the most probable biotic driver using field and environmental context. This approach reduces the risk of interpreting drought or heat stress as a specific pest or pathogen signal and provides a more transferable basis for operational forest-health monitoring.

Conclusions

Remote sensing provides a powerful means of observing biotic stress in spruce forests, but the reviewed evidence indicates that its most defensible role is the detection of physiological change and disturbance trajectories rather than direct diagnosis from a single image. Bark beetle infestation and fungal decay produce fundamentally different temporal and physiological responses: *Ips typographus* can generate detectable changes in water status, pigments and crown condition during the transition from green attack to visible decline, whereas root, butt, stem and heartwood decay may develop internally and remain weakly expressed in optical canopy data. These differences explain why temporal red-edge and SWIR information are particularly relevant for early bark beetle detection, while chronic decay requires stronger integration of structural and field-based information. No universal spectral index should therefore be expected to distinguish all forms of biotic stress.

The main methodological solution emerging from the literature is a multitemporal, stage-aware and multisource monitoring framework. Sentinel-2 time series should provide the regional backbone, complemented by red-edge/NIR/SWIR features, climate and stand variables, while UAV or high-resolution observations should be used for individual-tree assessment and targeted validation. Structural information from ALS and reliable field, harvest or pathological observations are particularly important for detecting or interpreting chronic internal decay. ML can integrate these heterogeneous predictors, but model reliability depends on representative reference data and rigorous spatially independent validation. The proposed four-stage scheme from predisposition and physiological stress, through early attack and visible decline, to mortality or chronic decay provides a more biologically meaningful alternative to binary healthy/damaged classification.

For Bulgarian spruce forests, the priority should therefore not simply be to achieve higher classification accuracy, but to develop ecologically interpretable and transferable models supported by multi-site and multi-year reference datasets. Such a system should explicitly account for the interaction between climatic predisposition and subsequent biotic disturbance and should combine Sentinel-2 observations with targeted UAV/high-resolution data, environmental information and field validation. This framework would shift remote sensing from mapping already visible damage towards earlier identification of physiological deterioration and disturbance development, while maintaining the necessary distinction between what can be detected spectrally and what requires field confirmation.

References:

1. Abdullah, H., A. K. Skidmore, R. Darvishzadeh, M. Heurich. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (Ips typographus, L.) compared with Landsat-8. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 5(1), 2019, pp. 87–106. https://doi.org/10.1002/rse2.93
2. Allen, B., M. Dalponte, H. O. Ørka, E. Næsset, S. Puliti, R. Astrup, T. Gobakken. UAV-Based Hyperspectral Imagery for Detection of Root, Butt, and Stem Rot in Norway Spruce. Remote Sensing, 14(15), 2022, 3830. https://doi.org/10.3390/rs14153830
3. Bárta, V., P. Lukeš, L. Homolová. Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 100, 2021, 102335. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102335
4. Dalponte, M., A. J. I. Kallio, H. O. Ørka, E. Næsset, T. Gobakken. Wood Decay Detection in Norway Spruce Forests Based on Airborne Hyperspectral and ALS Data. Remote Sensing, 14(8), 2022a, 1892. https://doi.org/10.3390/rs14081892
5. Dalponte, M., Y. T. Solano-Correa, H. O. Ørka, T. Gobakken, E. Næsset. Detection of heartwood rot in Norway spruce trees with lidar and multi-temporal satellite data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 109, 2022b, 102790. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102790
6. Ecke, S., J. Dempewolf, J. Frey, A. Schwaller, E. Endres, H.-J. Klemmt, D. Tiede, T. Seifert. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. Remote Sensing, 14(13), 2022, 3205. https://doi.org/10.3390/rs14133205
7. Filchev, L. An assessment of European spruce bark beetle infestation using WorldView-2 satellite data. Proceedings of the 1st European SCGIS Conference with International Participation, 2012. https://doi.org/10.13140/2.1.3005.2647
8. Filchev, L. Application of satellite remote sensing for detection of abiotic stress in coniferous landscapes. Journal of the Bulgarian Geographical Society, 43, 2020, pp. 37–42. https://doi.org/10.3897/jbgs.2020.43.6
9. Georgiev, G. G., M. Georgieva, S. S. Dimitrov, M. B. Iliev, V. Trenkin, P. Mirchev, S. Belilov. Remote sensing assessment of the expansion of Ips typographus attacks in the Chuprene Reserve, Western Balkan Range. Forests, 13(1), 2022, 39. https://doi.org/10.3390/f13010039
10. Huo, L., H. J. Persson, E. Lindberg. Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: Normalized distance red & SWIR (NDRS). Remote Sensing of Environment, 255, 2021, 112240. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112240
11. Huo, L., E. Lindberg, J. Bohlin, H. Persson. Assessing the detectability of European spruce bark beetle green attack in multispectral drone images with high spatial- and temporal resolutions. Remote Sensing of Environment, 287, 2023, 113484. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113484

12. Immitzer, M., C. Atzberger. Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce (Picea abies, L.) using WorldView-2 data. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 2014(5), pp. 351–361. https://doi.org/10.1127/1432-8364/2014/0229
13. Kautz, M., J. Feurer, P. Adler. Early detection of bark beetle (Ips typographus) infestations by remote sensing – A critical review of recent research. Forest Ecology and Management, 556, 2024, 121595. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121595
14. Kędziora, W., K. Szyc, J. S. Silva, R. Wójcik. Drought and suboptimal habitats shape Norway spruce vulnerability to bark beetle outbreaks in Białowieża Forest, Poland. Land, 14(10), 2025, 2014. https://doi.org/10.3390/land14102014
15. Klouček, T., R. Modlinger, M. Zikmundová, M. Kycko, J. Komárek. Early detection of bark beetle infestation using UAV-borne multispectral imagery: A case study on the spruce forest in the Czech Republic. Frontiers in Forests and Global Change, 7, 2024, 1215734. https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1215734
16. Marvasti-Zadeh, S. M., D. Goodsman, N. Ray, N. Erbilgin. Early detection of bark beetle attack using remote sensing and machine learning: A review. ACM Computing Surveys, 56(4), 2023, Article 97. https://doi.org/10.1145/3625387
17. Mngadi, M., I. Germishuizen, O. Mutanga, R. Naicker, W. H. Maes, O. Odebiri, M. Schroder. A systematic review of the application of remote sensing technologies in mapping forest insect pests and diseases at a tree-level. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 36, 2024, 101341. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101341
18. Pivovar, M., R. Näsi, E. Honkavaara, M. Blaženec, J. Škvarenina, R. Modlinger, J. Rožnovský, R. Jakuš. Spectral signatures discrimination of Norway spruce trees under experimentally induced drought and acute thermal stress using hyperspectral imaging. Forest Ecology and Management, 586, 2025, 122692. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122692
19. Räty, J., J. Breidenbach, M. Hauglin, R. Astrup. Prediction of butt rot volume in Norway spruce forest stands using harvester, remotely sensed and environmental data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 105, 2021, 102624. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102624
20. Singh, V. V., A. Naseer, K. Mogilicherla, A. Trubin, K. Zabihi, A. Roy, R. Jakuš, N. Erbilgin. Understanding bark beetle outbreaks: exploring the impact of changing temperature regimes, droughts, forest structure, and prospects for future forest pest management. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 23, 2024, pp. 257–290. https://doi.org/10.1007/s11157-024-09692-5
21. Smigaj, M., A. Agarwal, H. Bartholomeus, M. Decuyper, A. Elsherif, A. de Jonge, L. Kooistra. Thermal Infrared Remote Sensing of Stress Responses in Forest Environments: a Review of Developments, Challenges, and Opportunities. Current Forestry Reports, 10, 2024, pp. 56–76. https://doi.org/10.1007/s40725-023-00207-z
22. Stone, C., C. Mohammed. Application of Remote Sensing Technologies for Assessing Planted Forests Damaged by Insect Pests and Fungal Pathogens: a Review. Current Forestry Reports, 3, 2017, pp. 75–92. https://doi.org/10.1007/s40725-017-0056-1
23. Wulder, M. A., J. C. White, A. L. Carroll, N. C. Coops. Challenges for the operational detection of mountain pine beetle green attack with remote sensing. The Forestry Chronicle, 85(1), 2009, pp. 32–38.
24. Zarco-Tejada, P. J., A. Hornero, R. Hernández-Clemente, P. S. A. Beck. Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection in a Mediterranean pine forest. Remote Sensing of Environment, 215, 2018, pp. 328–342. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.015

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF VEGETATION AS INDICATORS OF EARLY STRESS IN FOREST ECOSYSTEMS: A LITERATURE REVIEW

Mihaela Tsvetkova, Lachezar Filchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: mtsvetkova@space.bas.bg

Keywords: *Early stress, spectral characteristics, red edge, SWIR,* Ips typographus*, Norway spruce, vegetation indices*

Abstract: *Early detection of stress in forest ecosystems is a prerequisite for timely action against pests, diseases and drought. This literature review synthesizes evidence on the spectral characteristics of vegetation as indicators of early stress, with emphasis on coniferous forests and Norway spruce (Picea abies) stands attacked by the European spruce bark beetle (Ips typographus). It examines the physiological mechanisms underlying vegetation spectral responses, the sensitivity of the visible, red-edge, near-infrared (NIR) and shortwave-infrared (SWIR) regions, and the application of vegetation indices and different remote-sensing platforms. The reviewed studies indicate that the red and SWIR regions and the red edge have considerable potential for distinguishing stressed from healthy stands, although their performance depends on the sensor, observation timing and scale of analysis. Findings for the NIR region are less consistent, while spectral differences may occur before bark beetle attack, limiting their interpretation as specific evidence of infestation. The review outlines key limitations of current approaches and identifies priorities for future research, including multitemporal analysis, integration of remote-sensing data with field observations, and improved discrimination between biotic and abiotic stress.*

СПЕКТРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РАСТИТЕЛНОСТТА КАТО ИНДИКАТОРИ ЗА РАНЕН СТРЕС В ГОРСКИ ЕКОСИСТЕМИ: ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Михаела Цветкова, Лъчезар Филчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: mtsvetkova@space.bas.bg

Ключови думи: *Ранен стрес, спектрални характеристики, червен ръб, SWIR,* Ips typographus*, обикновен смърч, вегетационни индекси*

Резюме: *Ранното откриване на стрес в горските екосистеми е предпоставка за навременни мерки срещу вредители, болести и засушаване. Настоящият литературен обзор обобщава данни за спектралните характеристики на растителността като индикатори за ранен стрес, с акцент върху иглолистните гори и насажденията от обикновен смърч (Picea abies), нападани от европейския смърчов кожояд (Ips typographus). Разгледани са физиологичните механизми, определящи спектралния отговор на растителността, чувствителността на видимата област, червения ръб, близката инфрачервена (NIR) и късовълновата инфрачервена (SWIR) област, както и приложението на вегетационни индекси и различни дистанционни платформи. Анализираните изследвания показват, че червената и SWIR областта и червеният ръб имат значителен потенциал за разграничаване на стресирани от здрави насаждения, но ефективността им зависи от сензора, времето на наблюдение и мащаба на анализа. Резултатите за NIR са по-неоднозначни, а спектрални различия могат да се наблюдават още преди нападението от кожояда, което ограничава възможността те да бъдат интерпретирани като специфичен признак за заразяване. Обобщени са основните ограничения на съвременните подходи и са очертани насоки за бъдещи изследвания, включително използване на многовременни серии, комбиниране на дистанционни данни с наземни наблюдения и разграничаване на биотичния от абиотичния стрес.*

1. Introduction

Climate change and global trade increase the vulnerability of forests to disturbances, including diseases caused by fungi, bacteria, viruses and nematodes [1], while droughts, temperature extremes and heat waves become more frequent and severe [2]. The European spruce bark beetle (*Ips typographus*) is a typical example: it has killed more than 150 million m³ of forest in Europe over the last 50 years and in Sweden the affected volume rose from 3–4 million m³ in 2018 to 7 million m³ in 2019 [3]. Infested trees must be removed before the beetles leave the bark, which generally happens before the end of June [3]. Attacks are divided into three stages: green attack, without abnormal visible colours in the crowns; red attack, with yellowing or reddening; and grey attack, with progressive needle loss [3]. At the green-attack stage crowns show no significant colour change in the visible spectrum [3]. Field mensuration is the most accurate way to determine the stage of infection, but it is logistically difficult, time-consuming and expensive [1], whereas remote sensing can record short-term stress dynamics that ground methods cannot capture cost-effectively [4]. This paper summarises what is known about the spectral characteristics of vegetation as early-stress indicators, mainly in conifers, and outlines contradictions and gaps.

2. Physiological and optical basis

Leaf and needle reflectance is formed in three regions: the visible (VIS, 400–700 nm), where low reflectance results from pigment absorption; the near-infrared (NIR, 700–1100 nm), where high reflectance depends on cell structure; and the shortwave infrared (SWIR, 1100–2500 nm), where reflectance is reduced by absorption by water and biochemical compounds (Fig. 1) [1]. The red edge, the sharp rise between chlorophyll absorption in the red and NIR scattering, lies between 680 and 750 nm [5] and depends on chlorophyll content and stress [1].

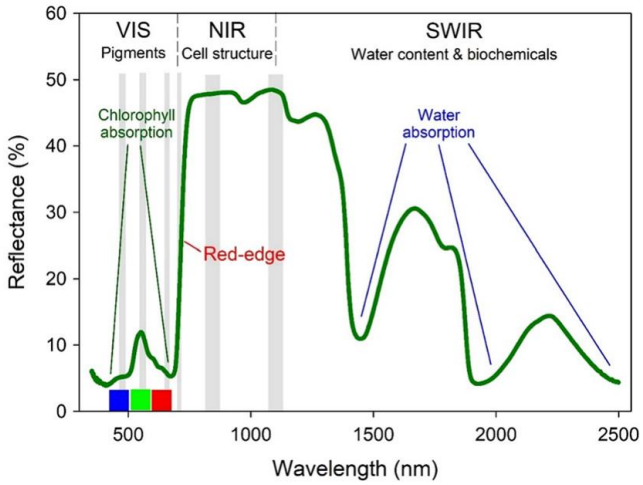


Fig. 1. Typical reflectance profile of healthy vegetation (350–2500 nm) with the VIS, NIR and SWIR regions, chlorophyll and water absorption and the red edge. Source: [1], Fig. 2, p. 23; reproduced under CC BY 4.0.

Stress reduces chlorophyll, which lowers absorption in the visible region and raises reflectance, particularly in the red band [6]. Differences between healthy and stressed vegetation are most evident in the green peak and the red edge, whereas the chlorophyll well and the NIR plateau may initially show no change [5]. The red-edge inflection point shifts towards shorter wavelengths under stress; Rock et al. (1988), reported a shift of about 5 nm in declining spruce and fir. Water affects reflectance mainly in the SWIR, but Carter (1993), considered leaf water content a less useful stress indicator than chlorophyll, consistently apparent only under advanced dehydration. The response is also not specific: similar spectral responses were reported for air pollution, herbicides, competition, dehydration, senescence and poor soils [5]. Infestation of *Picea abies* by bark beetles reduces chlorophyll and photosynthesis, but soil limitations or acid rain can cause the same symptoms, so the cause can be separated only with information on the duration and intensity of the process [4].

3. Spectral regions sensitive to early stress

Visible region. Classical laboratory and close-range studies identified the green region (about 560 nm) and the red edge (685–765 nm) as the most promising early indicators [5]. In Sentinel-2 data on spruce, the red band (B4) had the highest separability between healthy and stressed pixels on

most dates, but the lowest in summer (June–August), and its separability was higher in April–May than in June [3].

Red edge. For needles of spruce with 66–70% foliage loss caused by flooding, the most informative range was 701.0–715.7 nm and the band most sensitive to chlorophyll was 715.6 nm (range 709.9–722.1 nm) [7]. In spruce attacked by *I. typographus*, leaf reflectance was higher in the 680–790 nm range, and red-edge reflectance from RapidEye differed significantly on all dates [6]. However, the sensitivity of red-edge bands should not be interpreted as a universal indicator of green attack, because the timing and magnitude of spectral changes depend on the sensor characteristics, observation period and infestation stage [10].

NIR. Results are inconsistent. Stressed plants generally show lower NIR reflectance [2], and a slight decrease in the early NIR is typical of early disease stages [1]. For spruce, however, the NIR bands had the lowest separability [3], while a significant NIR difference appeared only from 2 July [6]. Huo et al. [3] attributed the inconsistency to pixel size, band positions and the share of attacked trees in the sample (about 30% in their plots versus 100% in the studies of Abdullah et al.).

SWIR. Bands sensitive to leaf water content are narrow and centred on 1450, 1940 and 2500 nm [5]. In Sweden, Sentinel-2 bands B11 and B12 had the highest separability, B12 before July and B11 afterwards [3]. In the Bavarian Forest National Park, SPOT-5 SWIR reflectance differed significantly from 11 May, and leaf reflectance of attacked trees was higher at 1110–1490 nm [6]. For diseases, however, SWIR changes are more typical of late stages [1]. The main findings are summarised in Table 1.

The importance of multitemporal analysis is further demonstrated by Jamali et al. [10], who examined Sentinel-2 time series from 2015–2021 together with harvester data in southeastern Sweden. The SWIR bands showed the greatest separation between healthy and attacked pixels, followed by the red-edge and red bands. Change-detection methods identified infestation-related changes in smoothed vegetation-index time series, although detection timing and performance depended on the method and the temporal data available [10].

Table 1. Spectral regions and main findings on early stress in conifers

Region	**Main findings**	**Source**
Green (~ 550–560 nm)	Early indicator in laboratory and close-range studies; 521–571 nm important in ash (VIP > 0.95)	[5, 9]
Red (660–690 nm)	Higher reflectance under stress; B4 most separable on most dates, least in summer	[6, 3]
Red edge (680–760 nm)	Spruce: 701.0–715.7 nm (laboratory); leaf reflectance higher at 680–790 nm; inflection point shifts to shorter wavelengths in decline	[7, 6, 5]
NIR (760–1000 nm)	Inconsistent: lowest separability in [3]; significant from 2 July in [6]	[3, 6]
SWIR (1100–2500 nm)	Highest separability (B11, B12) in spruce; significant from 11 May (SPOT-5); late-stage change in diseases	[3, 6, 1]

4. Studies on spruce and the spruce bark beetle

Abdullah et al. [6] monitored 66 healthy and 54 attacked spruce trees in the Bavarian Forest National Park on three dates between 15 May and 10 July 2015. All measured leaf traits (chlorophyll, chlorophyll fluorescence, nitrogen, water content, stomatal conductance) differed significantly ($p < 0.05$), with larger differences on the second and third dates; total chlorophyll was 337, 403 and 399 mg/m² in healthy and 317, 301 and 275 mg/m² in attacked trees [6]. At stand level, NDRE (RapidEye) began to separate healthy and attacked plots from 2 July, about a month earlier than the other indices, while the SWIR-based DSWI and NDWI showed significant differences on 5 June and 10 July [6]. The spectral difference peaked from mid-June to early July [6].

Huo et al. [3] analysed Sentinel-1 and Sentinel-2 data from southern Sweden (2018–2019) with 200 reference pixels interpreted from Pléiades imagery and 78 field plots (38 attacked, 40 healthy), in which the share of attacked trees was 18–60%, on average 30% [3]. Pixel values of stressed forest were significantly higher ($p < 0.05$) throughout the season, including before swarming began in mid-April [3]. The red and SWIR bands showed the highest separability and the NIR bands the lowest (Fig. 2), while radar backscatter contributed only slightly [3].

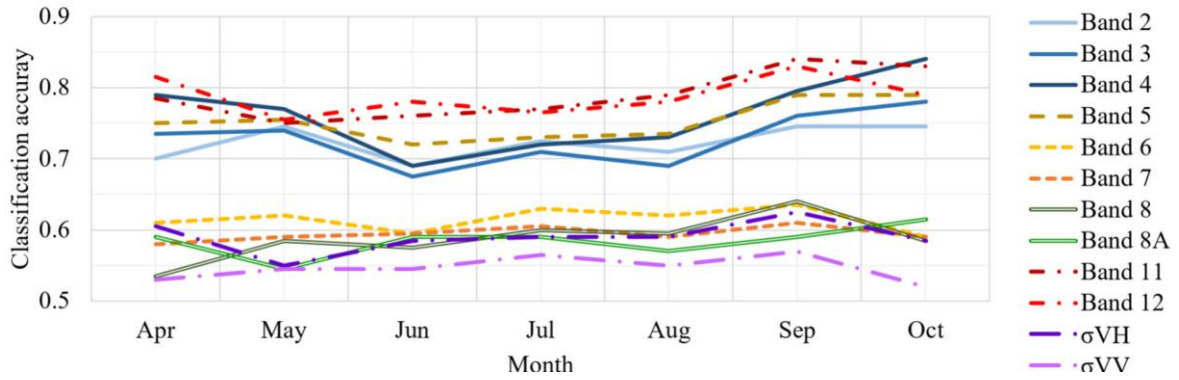


Fig. 2. Separability of individual Sentinel-2 bands and Sentinel-1 backscatter (σVH, σVV) by month, expressed as classification accuracy from linear discriminant analysis. Source: [3], Fig. 8, p. 9; reproduced under CC BY 4.0.

Red and SWIR reflectance are approximately linearly related (R^2 = 0.52 and 0.73 on two dates), and stressed pixels lie further from the origin (Fig. 3) [3]; on this basis the authors proposed the NDRS index. Their key caveat is that spectral differences exist before the attack and should therefore not be interpreted solely as a response to infestation [3]. This agrees with the preference of beetles for weakened trees [3]. Note that stress in the experiments of Masaitis et al. [7] (flooding) and Eitel et al. [8] (girdling) was not caused by beetles.

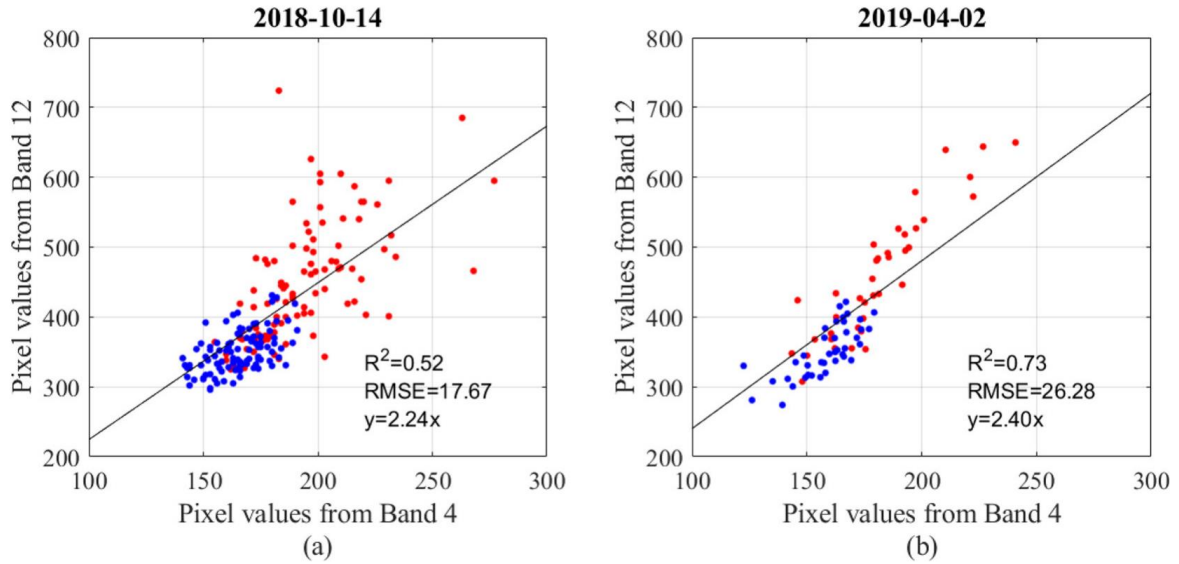


Fig. 3. Sentinel-2 band 4 (red) versus band 12 (SWIR) values for healthy (blue) and stressed (red) forest: (a) 14 October 2018; (b) 2 April 2019. Source: [3], Fig. 7, p. 7; reproduced under CC BY 4.0.

5. Vegetation indices

Huo et al. [3] tested 12 indices: NDWI and RDI gave the highest classification accuracy, followed by DSWI, and indices combining NIR and SWIR bands generally outperformed those using visible bands only, which in turn outperformed those combining NIR and visible bands. Their NDRS index, calculated from Sentinel-2 B4 and B12 as a normalised distance from the origin, was about 10% more accurate than NDWI and RDI in all months (Fig. 4) [3] and reached accuracies of 0.85, 0.80 and 0.89 in April, June and September (threshold 0.5) [3]. NDRS detects stress existing before the attack but is not sensitive to green-attack changes [3].

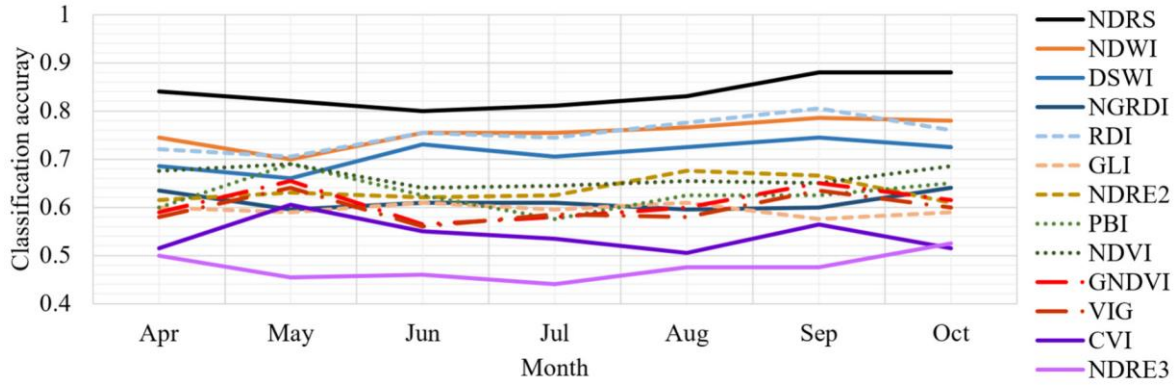


Fig. 4. Separability of 12 vegetation indices and of NDRS by month (classification accuracy from linear discriminant analysis). Source: [3], Fig. 9, p. 9; reproduced under CC BY 4.0.

Red-edge indices respond earlier than red-band indices in broadband satellite data. In RapidEye data of a conifer woodland in New Mexico, NDRE dropped below the no-change zone 13 days after girdling, whereas NDVI and GNDVI responded about 16 days later [8]. Radiative transfer simulation (PROSPECT+SAIL) showed that NDVI saturates above 30 µg/cm² of total chlorophyll, while NDRE remains sensitive across 0–65 µg/cm² [8]. At later stages, with very low chlorophyll and needle loss, NDVI remained responsive and NDRE did not, and applicability to green-attack detection remains untested [8]. A review of forest water stress also found that simple water indices such as NDWI and SIWSI give unsatisfactory results for forest objects, and that widely used NDVI and EVI record damage but do not allow early detection [2].

6. Platforms and sensors

Platforms range from handheld spectrometers to satellites (Fig. 5). In forest water-stress studies satellite data dominate (163 applications versus 27 airborne, 23 ground-based and 11 UAV), and NIR (167) and visible (147) data are used far more often than hyperspectral data (14) [2]. Satellites provide wide coverage and regular data [2], but limits in spatial, spectral, temporal and radiometric resolution may cause errors in green-attack detection, which is why UAV, airborne and future hyperspectral satellites (EnMAP, CHIME, HyspIRI) are proposed [6].

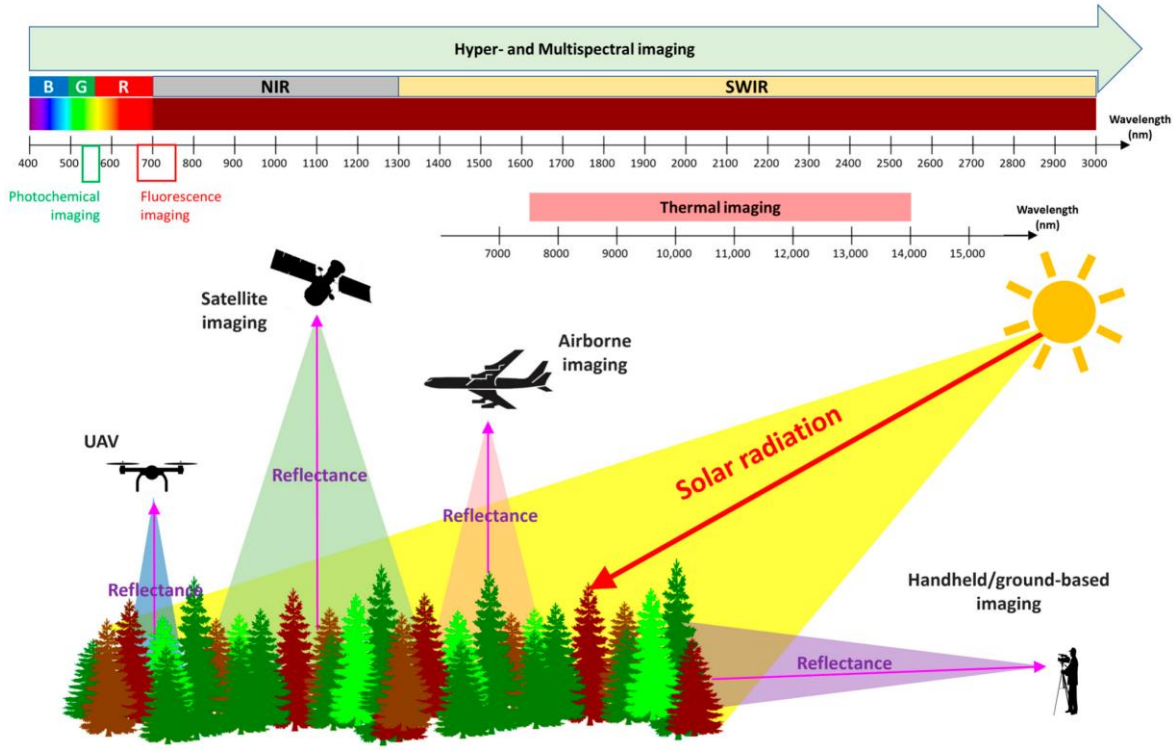


Fig. 5. Main remote sensing platforms and imaging methods for detecting stress in forests. Source: [2], Fig. 2, p. 4 (original by T.S. Le); reproduced under CC BY 4.0.

Hyperspectral data allow selection of the most sensitive bands. Using a UAV hyperspectral camera (400–1000 nm, 150 channels, 5 cm) and LiDAR over ash trees attacked by *Agrilus planipennis*, Zhou et al. [9] identified 678 nm as the most informative band and built NDVI(776,678); combined with LiDAR, the model reached 82.90% overall accuracy and 76.25% for lightly damaged trees, against 50% for LiDAR alone (Fig. 6) [9]. This is a broadleaf species and a different pest, but the study illustrates band selection. For spruce, WorldView-2 multispectral data reached about 75% overall accuracy for three classes, and HyMap hyperspectral data with 4 m pixels 64% [4]; high-resolution multispectral data with decisive bands may thus outperform hyperspectral data [4]. More broadly, a systematic evidence synthesis by Torres et al. [11] found that satellite multispectral data were among the most frequently used technologies in forest-health research, whereas relatively few studies adopted an explicit early-warning perspective. This highlights the need to distinguish retrospective damage mapping from the prospective detection of subtle stress-related changes [11].

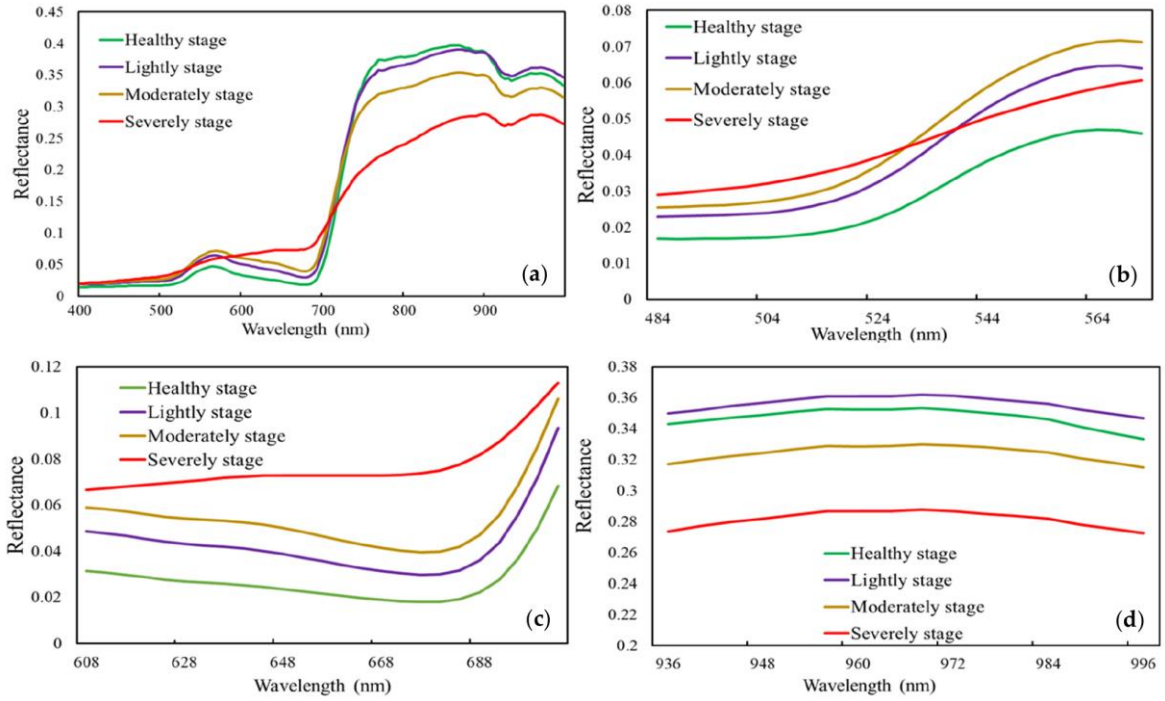


Fig. 6. Mean reflectance of ash canopies at different stages of EAB damage in selected sensitive ranges: (a) 400–1000 nm; (b) 484–571 nm; (c) 608–698 nm; (d) 938–1000 nm. Source: [9], Fig. 10, p. 11; reproduced under CC BY 4.0.

7. Limitations and open questions

First, few studies include spectral data from before the onset of an attack [3], so pre-existing stress cannot be separated from the response to infestation; such differences may be used for early stress detection, but tracing green-attack symptoms requires excluding them [3]. Second, spectral responses are non-specific [4] and natural seasonal changes in chlorophyll and water overlap with stress [5]. Third, larger pixels dilute small early-stage changes [3], and the broad bands of operational satellites mix sensitive and insensitive regions [5]. Fourth, the maximum spectral difference between attacked and healthy spruce (mid-June to early July) [6] comes later than ideal, because adult beetles may leave the bark at the end of June [3]. Finally, many forest diseases and regions remain unexplored, and hyperspectral sensors, long-term monitoring, discrimination of causes and multisensor approaches are needed [1].

8. Conclusion

The reviewed literature indicates that spectral remote sensing provides valuable opportunities for assessing early stress in forest ecosystems, particularly in coniferous stands affected by the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). The visible, red-edge and shortwave-infrared (SWIR) regions are the most frequently reported sources of information on stress-related changes in pigment content, canopy structure and water status. In particular, Sentinel-2 studies have demonstrated the potential of red and SWIR bands to distinguish stressed from apparently healthy spruce stands, while red-edge-based indices have shown promising sensitivity to changes in chlorophyll content. However,

no single spectral region or vegetation index can be considered universally optimal. Performance varies with the sensor's spectral and spatial resolution, the timing of observations, the proportion of affected trees within a pixel, and the physiological stage of stress. Evidence from the near-infrared (NIR) region remains less consistent, further demonstrating the importance of interpreting spectral responses in their ecological and observational context.

A major limitation is the lack of specificity of optical responses. Changes in reflectance may result from bark beetle infestation, drought, heat, other biotic agents or their combined effects. Moreover, spectral differences between subsequently attacked and apparently healthy stands may already be present before infestation, indicating that predisposition to attack and the response to a confirmed attack should not be treated as equivalent phenomena. Although such pre-existing differences may be useful for assessing vulnerability, their presence alone does not establish that an infestation has occurred. This distinction is particularly important for green-attack detection, when visible crown symptoms may still be absent and the available spectral signal may be subtle or inconsistent.

Future research should therefore prioritise multitemporal analyses that include observations before and after confirmed attacks, systematic field validation and explicit consideration of seasonal and environmental variability. Combining Sentinel-2 time series with higher-resolution UAV observations, field measurements and relevant climatic and stand-level variables could improve the interpretation of early changes and help distinguish biotic from abiotic stress. Hyperspectral and thermal observations also offer opportunities to investigate more subtle physiological responses, although their practical value must be assessed against data availability, spatial coverage and operational requirements. Future studies should report validation procedures transparently and test their methods across independent sites and observation periods.

Overall, remote sensing should be regarded as a complementary tool for forest-health monitoring rather than a stand-alone means of identifying the causal agent of stress. Its greatest potential lies in detecting changes, tracking their development over time and identifying areas that require targeted field inspection. Progress towards reliable early-warning systems will depend not only on identifying sensitive spectral bands or indices, but also on integrating spectral evidence with ecological processes, field observations and robust validation.

References:

1. Cotrozzi, L. Spectroscopic detection of forest diseases: a review (1970–2020). Journal of Forestry Research, 33, 2022, pp. 21–38. https://doi.org/10.1007/s11676-021-01378-w
2. Le, T. S., R. Harper, B. Dell. Application of remote sensing in detecting and monitoring water stress in forests. Remote Sensing, 15(13), 2023, 3360. https://doi.org/10.3390/rs15133360
3. Huo, L., H. J. Persson, E. Lindberg. Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: Normalized distance red & SWIR (NDRS). Remote Sensing of Environment, 255, 2021, 112240. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112240
4. Lausch, A., S. Erasmi, D. J. King, P. Magdon, M. Heurich. Understanding forest health with remote sensing – Part I – A review of spectral traits, processes and remote-sensing characteristics. Remote Sensing, 8(12), 2016, 1029. https://doi.org/10.3390/rs8121029
5. Treitz, P. M., P. J. Howarth. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. Progress in Physical Geography, 23(3), 1999, pp. 359–390. DOI: 10.1191/030913399673417384
6. Abdullah, H., A. K. Skidmore, R. Darvishzadeh, M. Heurich. Timing of red-edge and shortwave infrared reflectance critical for early stress detection induced by bark beetle (Ips typographus, L.) attack. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 82, 2019, 101900. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101900
7. Masaitis, G., G. Mozgeris, A. Augustaitis. Spectral reflectance properties of healthy and stressed coniferous trees. iForest, 6, 2013, pp. 30–36. https://doi.org/10.3832/ifor0709-006
8. Eitel, J. U. H., L. A. Vierling, M. E. Litvak, D. S. Long, U. Schulthess, A. A. Ager, D. J. Krofcheck, L. Stoscheck. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. Remote Sensing of Environment, 115(12), 2011, pp. 3640–3646.
9. Zhou, Q., L. Yu, X. Zhang, Y. Liu, Z. Zhan, L. Ren, Y. Luo. Fusion of UAV hyperspectral imaging and LiDAR for the early detection of EAB stress in ash and a new EAB detection index – NDVI(776,678). Remote Sensing, 14(10), 2022, 2428. https://doi.org/10.3390/rs14102428
10. Jamali, S., P. O. Olsson, A. Ghorbanian, M. Müller. Examining the potential for early detection of spruce bark beetle attacks using multi-temporal Sentinel-2 and harvester data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 205, 2023, pp. 352–366. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.10.013.
11. Torres, P., M. Rodes-Blanco, A. Viana-Soto, H. Nieto, M. García. The role of remote sensing for the assessment and monitoring of forest health: A systematic evidence synthesis. Forests, 12(8), 2021, 1134. https://doi.org/10.3390/f12081134

Session 4

Ecology and Risk Management

Chairmen: Prof. Garo Mardirossian, DSc

Secretary: Chief. Assis. Lyubomira Raykova

SPATIAL PATTERN OF GLOBAL STRONG SEISMICITY: A FRACTAL-GRAVITY INTEGRATED ANALYSIS

Boyko Ranguelov, Rosen Iliev

Space Research and Technology – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: branguelov@gmail.com, ilievrosen@space.bas.bg

Keywords: *Fractal dimension, Gravity anomaly, Variogram, Earthquakes, spatial analysis*

Abstract: *Understanding the spatial relationship between lithospheric heterogeneity and strong seismicity is important for global geodynamic studies. This study investigates the nonlinear spatial association between gravity anomalies and strong earthquakes using a variogram-based fractal dimension (FD) approach. High-resolution global Bouguer, Free-Air, and Isostatic gravity anomalies from the World Gravity Map 2012 were analyzed and compared with a global catalog of 5162 earthquakes of M ≥ 6.0 recorded between 1990 and 2025. Spatial statistical analyses, including Moran's I, bivariate Moran's I, Pearson correlation, and local cluster analysis, reveal a strong spatial association between earthquake epicenters and gravity-anomaly fractal dimensions. Most strong earthquakes occur in areas with FD values of 1.0–1.6, while events of M ≥ 8.0 are predominantly associated with FD values below 1.4 across all gravity anomaly types. These results indicate that fractal characteristics of gravity fields can capture tectonic complexity and lithospheric discontinuities associated with strong seismicity. The proposed methodology provides a framework for characterizing tectonically complex zones associated with strong seismic activity and may contribute to the spatial analysis of cascading multi-hazard events within the "Space and Ground Technologies for Studying Cascading Multi-hazard Events – Models, Applications, Precursors (SPARC)" project.*

ПРОСТРАНСТВЕНО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ГЛОБАЛНАТА СИЛНА СЕИЗМИЧНОСТ: ИНТЕГРИРАН ФРАКТАЛЕН И ГРАВИМЕТРИЧЕН АНАЛИЗ

Бойко Рангелов, Росен Илиев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: branguelov@gmail.com, ilievrosen@space.bas.bg

Резюме: *Разбирането на пространствената връзка между хетерогенността на литосферата и силната сеизмичност е важно за глобалните геодинамични изследвания. В настоящата работа е изследвана нелинейната пространствена зависимост между гравитационните аномалии и силните земетресения чрез фрактална размерност, изчислена посредством вариограмен анализ. Анализирани са глобални данни от World Gravity Map 2012 за аномалиите на Буге, свободен въздух и изостатичните аномалии, сравнени с каталог от 5162 земетресения с M ≥ 6.0 за периода 1990–2025 г. Пространствено-статистическите анализи, включващи Moran's I, двувариантния Moran's I, корелацията на Пиърсън и локален клъстерен анализ, показват силна положителна пространствена зависимост между епицентрите и фракталната размерност (FD) на гравитационните аномалии. Повечето земетресения са концентрирани в области с FD = 1.0–1.6, докато най-силните събития (M ≥ 8.0) преобладават при FD < 1.4 за всички изследвани типове аномалии. Резултатите показват, че фракталните характеристики на гравитационното поле могат да отразяват тектонската сложност и литосферните неоднородности, свързани със силната сеизмичност. Предложеният подход предоставя методическа рамка за пространствено характеризиране на зони, свързани със силна сеизмична активност, и може да подпомогне анализа на каскадни мултирискови събития в рамките на проекта „Космически и наземни технологии за изследване на каскадни мултирискови събития – модели, приложения, прекурсори" (SPARC).*

Introduction

Understanding the spatial complexity of Earth's lithosphere and its relationship with seismicity remains a central challenge in geophysics. Natural surfaces and tectonic structures commonly exhibit scale-invariant properties that can be described using fractal geometry (Voss, 1988; Turcotte, 1997). Among the approaches used to quantify spatial complexity, variogram-based methods provide an effective means of estimating local fractal dimension (FD) from raster data (Oliver & Webster, 2014).

In seismology, FD can characterize the spatial complexity and structural heterogeneity of fault systems, with higher values generally associated with more irregular and multi-segment fault structures and tectonically complex environments capable of generating strong earthquakes (Aydindag & Kirci, 2021; Chauhan & Dixit, 2024; Zhao et al., 2025). High-resolution FD mapping can therefore contribute to the characterization of tectonic environments and the identification of zones associated with strong seismic activity, particularly along convergent and divergent plate boundaries. In this study, intraplate earthquakes are not considered because they are relatively rare and commonly occur within more spatially homogeneous crustal environments.

Gravity anomalies provide important information on subsurface mass distribution and lithospheric density variations. The World Gravity Map 2012 (WGM2012) integrates satellite (GRACE, GOCE), terrestrial, and airborne gravity observations to produce global grids of Free-Air, Bouguer, and Isostatic gravity anomalies (Bonvalot et al., 2012). These datasets provide information on crustal and lithospheric structures, including rifts and subduction zones, many of which are associated with active tectonic deformation and seismicity.

The present study combines variogram-based fractal analysis, global gravity anomaly data, and seismicity records from the United States Geological Survey (USGS) to investigate the spatial relationship between gravity-field complexity and strong earthquake locations. Using a global catalog of earthquakes with M ≥ 6.0 recorded between 1990 and 2025, we examine whether spatial variations in the fractal dimension of gravity anomalies are associated with the distribution of strong earthquake epicenters. This approach provides a framework for investigating the relationship between lithospheric heterogeneity, tectonic complexity, and strong seismic activity.

Working methods, data and software

Variogram Method for Fractal Dimension Calculation

This study uses the variogram-based technique to assess fractal characteristics of gravity data, producing spatially explicit fractal dimension maps. The method is based on the idea that natural surfaces often show self-affine or scale-invariant features, which can be quantified through geostatistical measures like the variogram (Voss, 1984; Oliver & Webster, 2014). The analytical procedure used algorithm, implemented in Python within the QGIS environment, utilizing GDAL for raster I/O and NumPy for numerical computations.

For each selected window the following analytical steps were applied:

- Moving Window Analysis

Local fractal dimensions are calculated using a moving square window of fixed size 64 × 64 pixels. The window is shifted across the raster with a step of 16 pixels in both directions.

- Variogram computation and power-law scaling assessment

An experimental variogram is approximated using squared differences between pixel values for lag distances from 1 to 6 pixels. For computational efficiency, only horizontal and vertical pixel pairs are considered. For each lag h, the variogram value is computed as the average of squared differences in both directions and normalized by a factor of 1/4.

- Fractal dimension estimation

The local fractal dimension FD of the 2D surface was derived directly from the variogram slope using the well-established relation for self-affine fractional Brownian surfaces:

(1) $FD = 2 - (m / 2)$

Fractal Dimension (FD) near 2 indicates for higher gravity values variability, while values near 1 correspond to smoother gravity values variability.

Global Gravity Model WGM2012

The World Gravity Map 2012 (WGM2012) is a global gravity dataset developed by Bureau Gravimétrique International (BGI), integrating satellite gravity (GRACE, GOCE) with terrestrial and airborne gravimetric data (Bonvalot et al., 2012). WGM2012 includes grids of Bouguer anomaly, Free-Air anomaly, isostatic residuals, and crustal thickness at 1 arc-minute (~ 2 km) resolution. It refines the EGM2008 satellite gravity model by assimilating ground data and digital elevation models to better remove topographic effects (Pavlis et al., 2012). WGM2012 is widely used in geodynamic studies, calibrated with seismic and geophysical observations.

Tectonic boundaries were referenced using the digital plate boundary dataset by Bird (2003).

Seismic Data

Seismic analysis uses data from the USGS Seismic Hazard Program's global earthquake catalog (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/). A random seed–based selection was performed to generate a statistically representative sample of 5162 earthquakes with magnitude M ≥ 6.0 from the period 1990–2025.

Software

Spatial and statistical analysis within this study was performed in QGIS (python-based scripts) and GeoDa environment, an open-source GIS platforms widely used in Earth sciences.

Results and discussion

This analysis is based on a refined random sample of 5162 earthquakes with M ≥ 6.0, focusing on possible relationships between earthquake locations, gravity anomalies, and their fractal dimensions (FD) (Fig. 1). Gravity anomaly distributions provide critical insight for the subsurface mass structure surrounding the sampled earthquake locations.

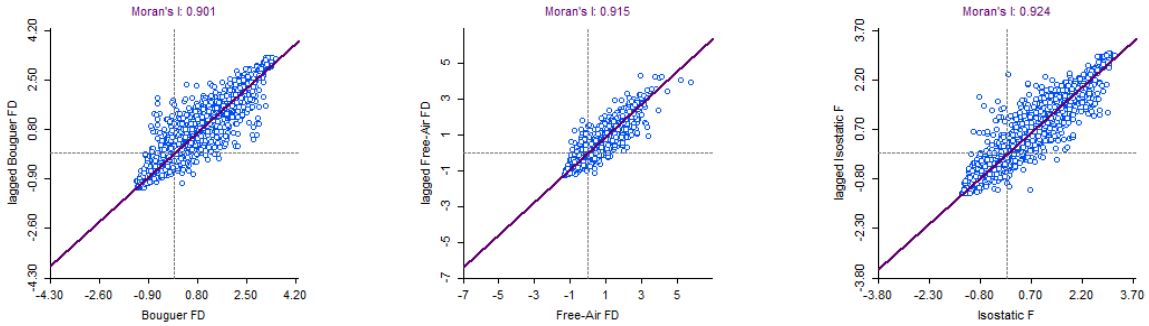
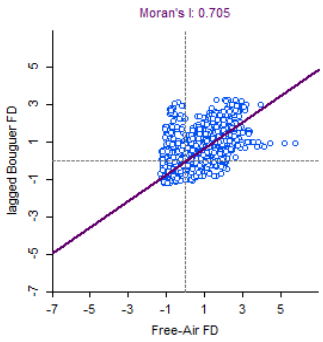
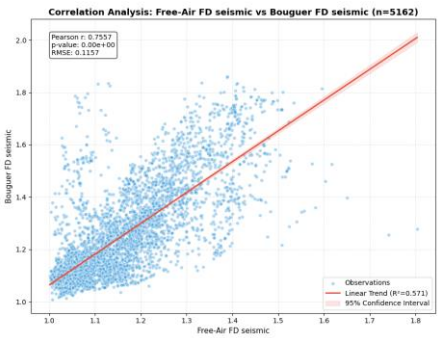
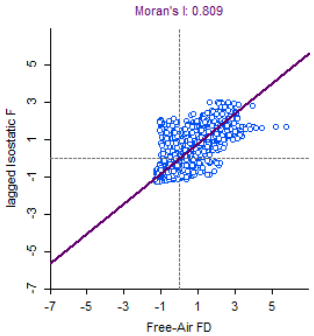
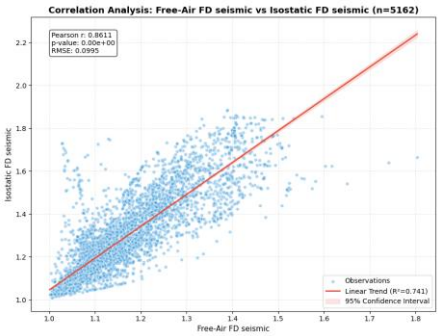


Fig. 1. Univariate Moran's I spatial autocorrelation analysis of strong earthquakes locations and corresponding gravity FD

The results in Figure 1 confirm the positive spatial autocorrelation of earthquakes with the values variation of gravity anomalies, expressed through the fractal dimension. The Moran's I values for all three types of anomalies are above 0.9, which is an indicator of a very strong relationship.

The statistical analysis (Bivariate Moran's I and Pearson Correlation) from Figure 2 indicates that M ≥ 6.0 seismic locations have a positive spatial autocorrelation with local FD gravity anomalies. Bivariate Moran's I analysis show very strong spatial autocorrelation between earthquakes and FD gravity anomalies, between 0.7 and 0.8 for three gravity types. The Pearson Correlation shows even stronger correlation (between 0.7–0.9), while the most prominence is the relation between earthquakes and corresponding Bouguer-Isostatic FD (r = 0.9135).

	Bivariate Moran's I	Pearson Correlation
Bouguer FD vs Free-Air FD		
Free-Air FD vs Isostatic FD		

Isostatic FD vs Bouguer FD

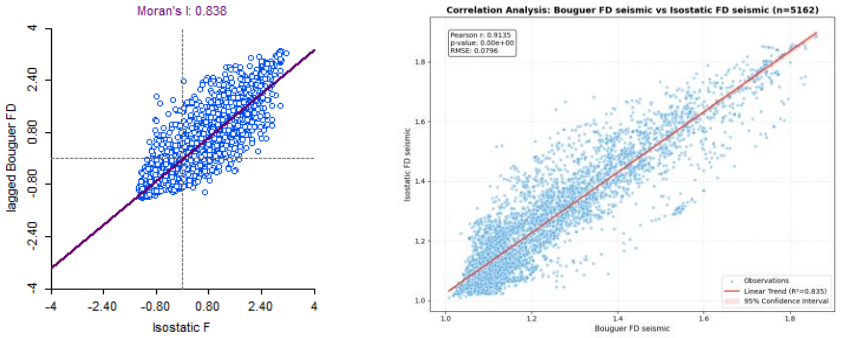
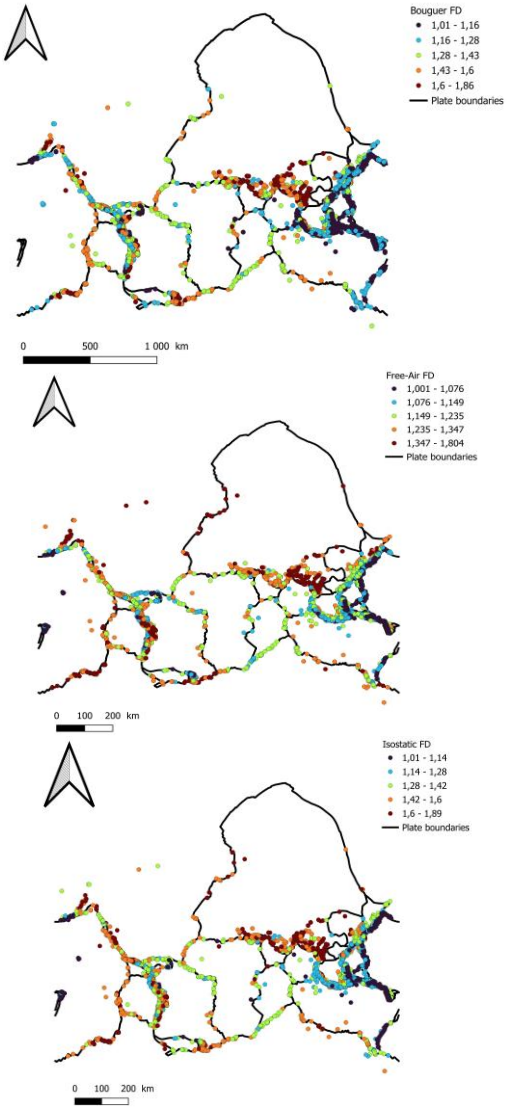


Fig. 2. Analysis of spatial and statistical relationship of FD gravity anomalies and strong earthquakes epicenters

The results in Figure 2 show that, above all, the fractal dimension of gravity anomalies can serve as a predictor of global strong seismicity. Fractal model of gravity anomalies captures sharp transitions in the Earth's crust and marks areas of tectonic dislocations. The fractal dimension is an indicator of sharp transitions, but can specific FD ranges be identified where seismic foci are concentrated? Figure 3 shows that strong earthquakes are concentrated in areas with fractal dimension of gravity anomalies, in ranges between 1.0–1.6 (95% of cases) for Bouguer, 1.0–1.5 (98% of cases) for Free-Air, and between 1.0–1.5 (98% of cases) for Isostatic anomaly. This distribution indicates low to moderate gravity values variation. The studied earthquakes have FD mean value 1.23 for Bouguer, 1.14 for Free-Air and 1.26 for Isostatic gravity anomaly.



	Bouguer FD
FD min	1.00
FD max	1.86
FD mean	1.23
StdDev	0.17

	Free-Air FD
FD min	1.00
FD max	1.80
FD mean	1.14
StdDev	0.11

	Isostatic FD
FD min	1.00
FD max	1.88
FD mean	1.26
StdDev	0.19

Fig. 3. Gravity FD ranges and strong earthquakes spatial concentration (Plate boundaries: Bird, 2003)

As shown in Figure 3, clear spatial patterns are evident in the distribution of FD gravity values. Earthquakes along the Alpine-Himalayan collision belt and the eastern Pacific Ring of Fire are generally associated with the highest FD values, whereas the western Pacific Ring of Fire and adjacent Indo-Australian Plate show lower values. Divergent plate boundaries are generally characterized by moderate FD values of approximately 1.3–1.4.

Cluster analysis indicates positive spatial autocorrelation between earthquake epicenters and all three gravity-anomaly FD types in approximately 97% of cases. Only 2.7% of earthquakes show no significant spatial correlation, predominantly in the Indian Ocean and eastern Pacific, while negative spatial autocorrelation occurs in only about 0.2% of events.

The strongest earthquakes ($M \geq 8.0$) are consistently associated with relatively low gravity FD values. Mean FD values are 1.22 for Bouguer, 1.15 for Free-Air, and 1.25 for Isostatic anomalies, with most values below 1.4 and predominantly within the 1.1–1.3 range. Spatially, the lowest values occur mainly along the western Pacific and Java trench regions, while somewhat higher values characterize the eastern Pacific.

No significant relationship was identified between gravity-anomaly FD values and earthquake magnitude or focal depth.

Conclusion

The constructed model reveals a positive spatial autocorrelation between the fractal dimension of gravity anomalies (Bouguer, Free-Air, and Isostatic) and strong seismic events ($M \geq 6.0$), located along the boundaries of divergent and convergent tectonic plates. The nonlinear behavior is confirmed by the calculated fractal dimensions and may serve as an important indicator for the occurrence of strong earthquakes. These results are consistent with the global distribution of strong earthquakes, which is well established in geodynamics and plate tectonics theory. Future local and regional studies, as well as more detailed investigations applying the same methodology, could help extract additional information from a geodynamic perspective.

Acknowledgements

This study was nationally co-funded by the project “Space and Ground Technologies for Studying Cascading Multi-hazard Events – Models, Applications, Precursors (SPARC)”, supported under Co-funding Contract No. KP-06-COST / 23 / dated 18 August 2026, concluded between the Space Research and Technology Institute at the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI–BAS) and the Bulgarian National Science Fund (BNSF) within the framework of BNSF-1.009 – “Procedure for Providing National Co-funding for the Participation of Bulgarian Research Teams in Established Actions in Science and Technology.”

References:

1. Aydindag, E. B., P. Kirci. “Determination of the Fractal Dimension of the Active Fault Data along the East Anatolian Fault Zone.” Baltica, 34(1), 2021, pp. 71–80.
2. Bird, P. “An Updated Digital Model of Plate Boundaries.” Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 4(3), 2003, 1027.
3. Bonvalot, S., G. Balmino, A. Briais, M. Kuhn, A. Peyrefitte, N. Vales, R. Biancale, G. Gabalda, F. Reinquin, M. Sarrailh. World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris, 2012.
4. Chauhan, V., J. Dixit. “Fractal Analysis of Major Faults and Fractal Dimension of Lineaments in the Indo-Gangetic Plain on a Regional Scale.” Earthquake Science, 37(2), 2024, pp. 107–121. DOI: 10.1016/j.eqs.2024.01.015.
5. Oliver, M. A., R. Webster. “A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing and Modelling Variograms and Kriging.” Catena, 113, 2014, pp. 56–69. DOI: 10.1016/j.catena.2013.09.006.
6. Pavlis, N. K., S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. Factor. “The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008).” Journal of Geophysical Research, 117, 2012. DOI: 10.1029/2011JB008916.
7. Turcotte, D. L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. 2nd Edition, Cambridge University Press, New York, 1997.
8. Voss, R. F. “Multiparticle Fractal Aggregation.” Journal of Statistical Physics, 36(5/6), 1984, pp. 861–872.
9. Voss, R. F. “Fractals in Nature: From Characterization to Simulation.” In H. O. Peitgen, D. Saupe (Eds.), The Science of Fractal Images, Springer, 1988, pp. 21–70. DOI: 10.1007/978-1-4612-3784-6_1.
10. Zhao, C., S. Fu, Y. Huang. “Fractal Characteristics of the Spatial Distribution of Mine Earthquake Sources in the Vicinity of a Fault: A Case Study in the Ashele Copper Mine.” Fractal and Fractional, 9(1), 2025, p. 3. DOI: 10.3390/fractalfract9010003.

INSAR И GNSS МОНИТОРИНГ НА „РОЯ“ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ НА ОСТРОВ САНТОРИНИ ОТ ЯНУАРИ ДО МАРТ 2025 Г.

Димитър Димитров[1], Пиер Бриол[2]

[1]Национален институт по геофизика, геодезия и география (НИГГГ) – БАН
[2]École normale supérieure (ENS), Париж, Франция
e-mail: clgdimi@abv.bg

Ключови думи: *земетресения, InSAR и GNSS данни*

Резюме: *Представени са резултатите от мониторинг на „Роя“ земетресения от януари – март 2025 г. на остров Санторини.*

INSAR И GNSS MONITORING OF SANTORINI EARTHQUAKES SWARM OF JANUARY – MARCH 2025

Dimitar Dimitrov[1], Pierre Briole[2]

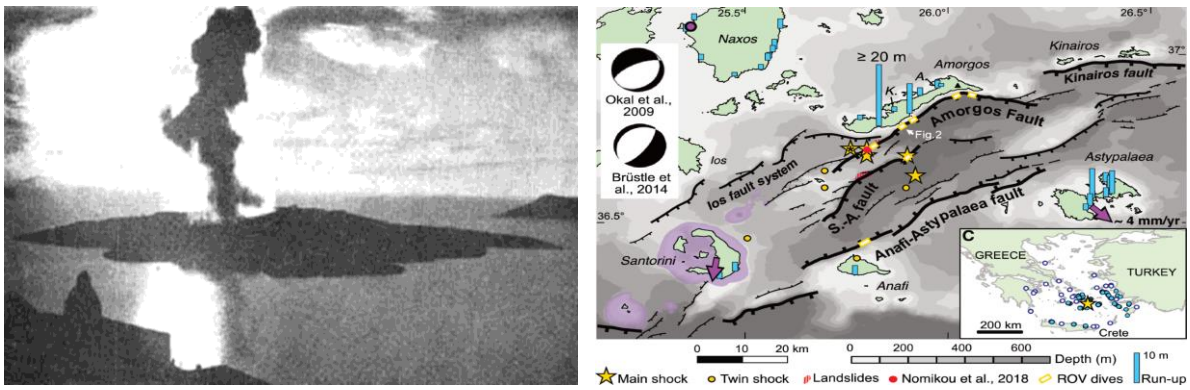
[1]NIGGG of Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
[2]École normale supérieure (ENS), Paris, France
e-mail: clgdimi@abv.bg

Key words*: Earthquakes, InSAR and GNSS data*

Abstact: *We present the results of study of Santorini earthquakes warm of January – March 2025 by InSAR and GNSS monitoring*

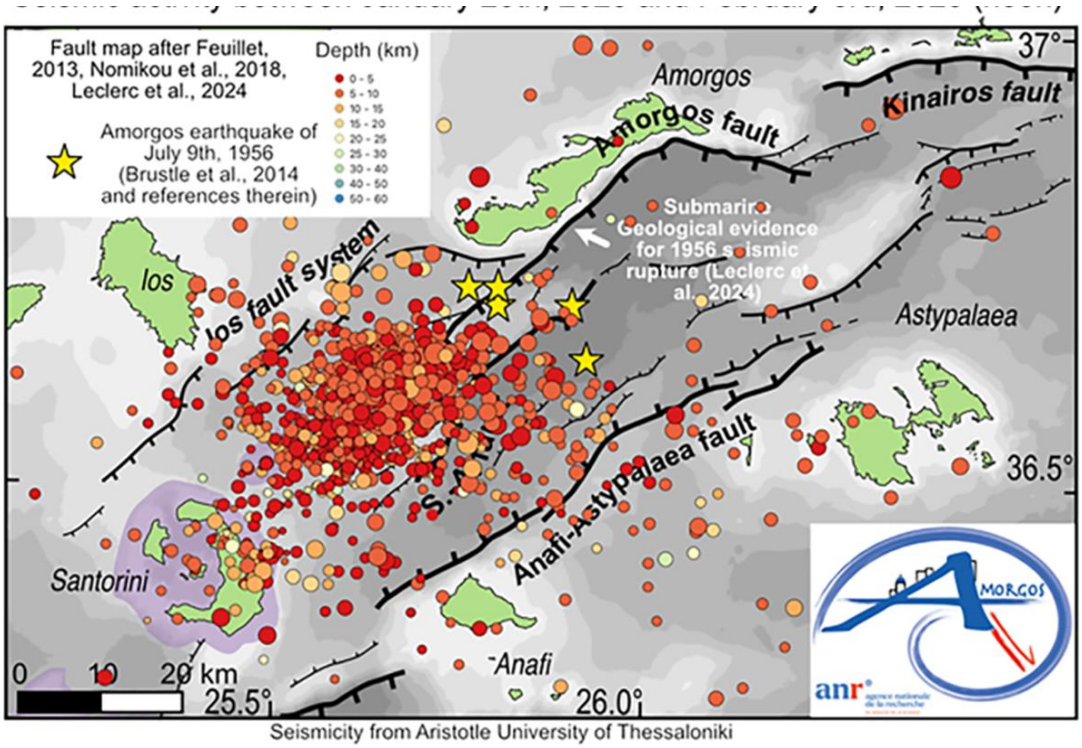
Вулканът Санторини е остров формиран по геоложки данни преди 520 000 г. и е изригвал многократно, като последно изригване е на 10.01.1950 г. (Фиг. 1а). Катастрофално земетресение на 09.06.1956 г. с M = 7.7 поразява Санторини, като епицентърът е на около 50 km NE от острова. Трусът е довел до значителни ко-сеизмични разкъсвания на земната повърхност на съседни острови (Фиг. 1б), В тази зона през януари 2025 г. се активира „Рой“ от 3075 земетресения от 26 януари 2025 до 03 март 2025 г., с максимален магнитуд M = 5.3.

„Рой“ земетресения е серия от голям брой сеизмични трусове, които се случват за сравнително кратък период от време и в ограничен географски район. За разлика от класическата сеизмична активност, при която има един ясно изразен и силен главен трус, последван от по-слаби вторични трусове, при „Роя“ земетресения нито един от трусовете не е с доминиращ магнитуд и не се отличава по сила от останалите.



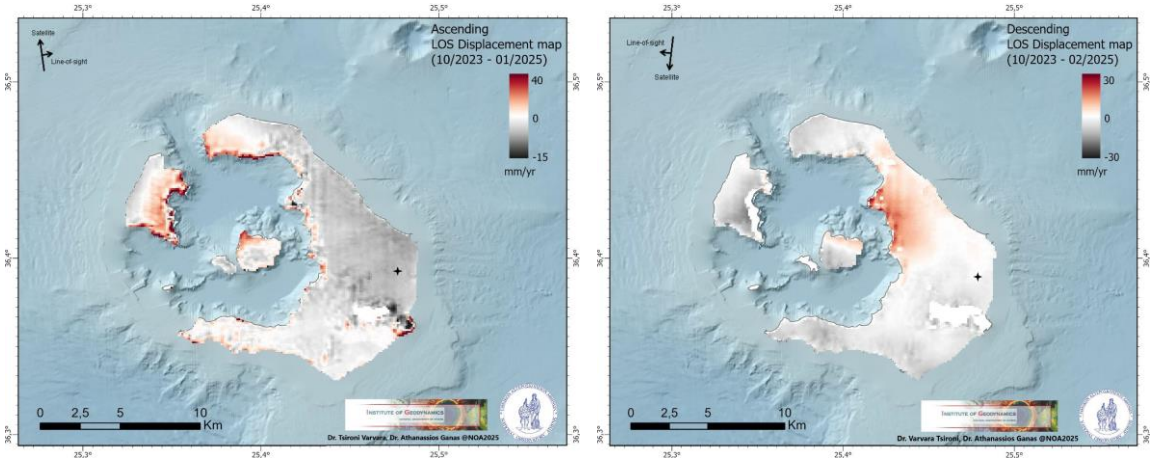
а) б)

Фиг. 1а. Последно изригване на 10.01.1950 г. на вулканът Санторини
Фиг. 1б. Катастрофално земетресение на 09.06.1956 г. с M = 7.7



Фиг. 2. Зоната на „Роя“ земетресенията от 26.01.2025 до 03.02.2025 г., с
аксимална M = 5.3,
с главните разломи в района

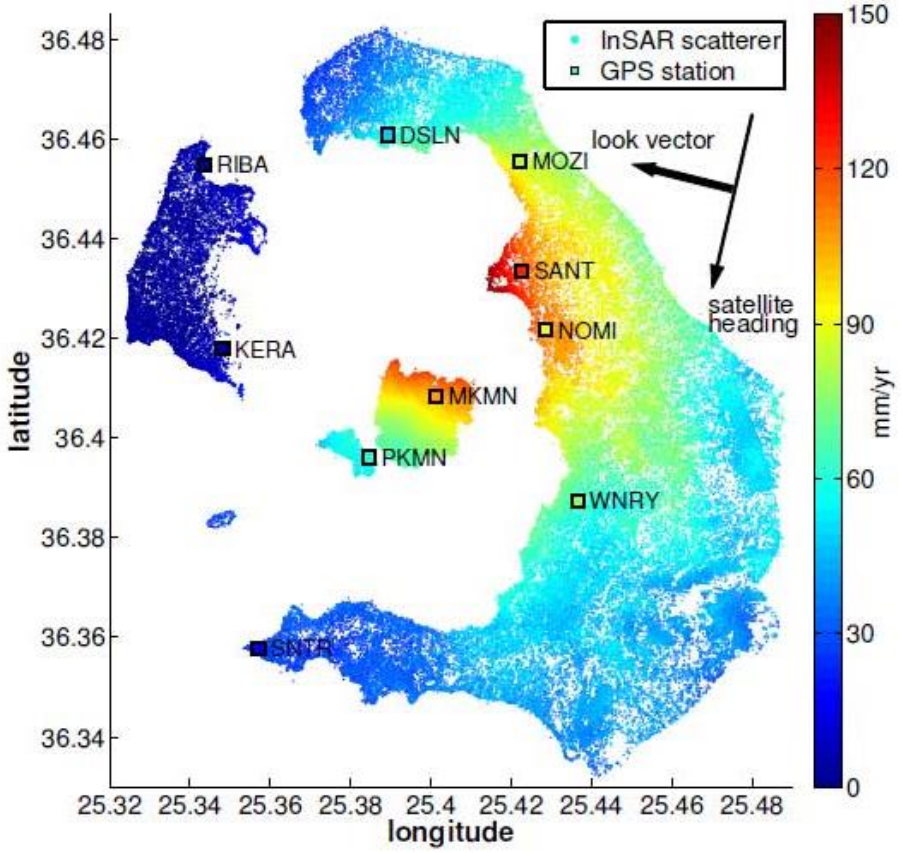
Именно в тази сеизмогенна зона ние потърсихме и анализирахме повърхностните скорости на движение на остров Санторини 10.2023–01.2025 г. от спътника Sentinel-1 SLC на Европейската космическа агенция. На фиг. 3а – възходяща орбита и повърхностни скорости 10.2023–02.2025 г. и низходяща орбита (Фиг. 3б) от времевите InSAR серии от спътника Sentinel-1. Бяха получени скорости на издигане на отделни зони до 30-40 mm/год. (Фиг. 3а и Фиг. 3б).



а) б)

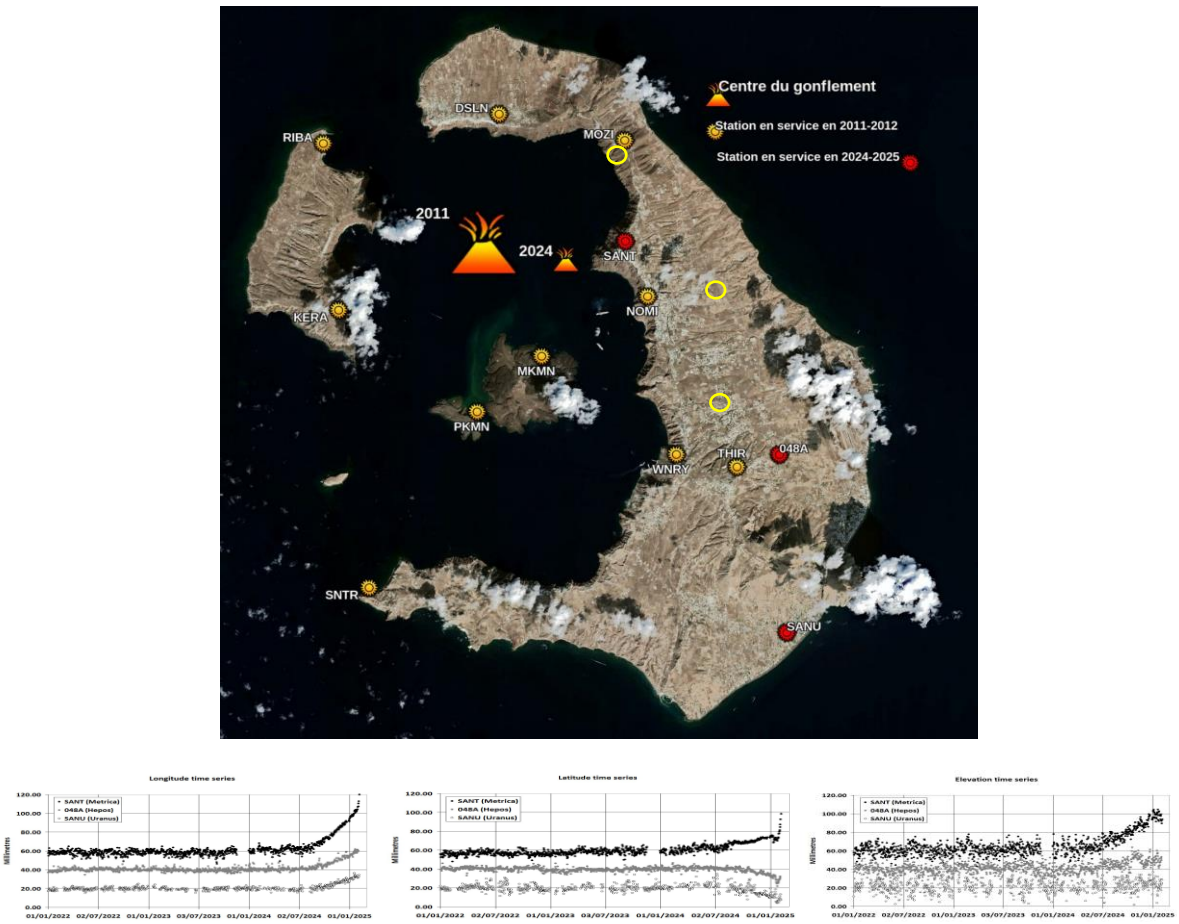
Фиг. 3а. Повърхностните скорости на остров Санторини 10.2023 – 01.2025 г. от спътника Sentinel-1 на Европейската космическа агенция – възходяща орбита
Фиг. 3б. Повърхностни движения 10.2023–02.2025 г. – низходяща орбита от времевите InSAR серии от спътника Sentinel-1A

Анализирахме и сравнихме повърхностните премествания на остров Санторини от повторни GNSS измервания и InSAR-низходяща орбита образи, за периода 2011–2012 г. и се установи средна скорост на максималното издигане до 140 mm/год (Фиг. 4).



Фиг. 4. Резултати от мониторинга на 2011 – 2012 г. с GNSS и InSAR-низходяща орбита

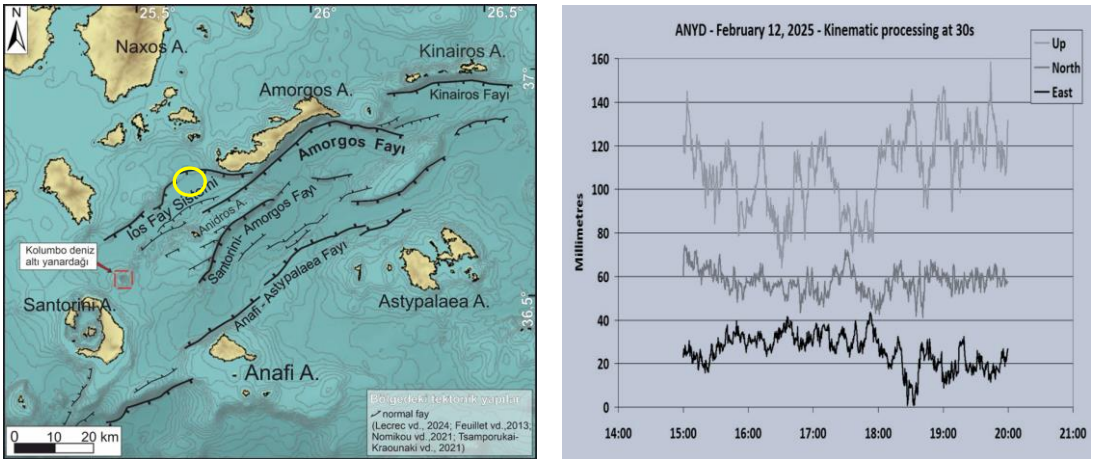
Анализирахме и сравнихме и повърхностните премествания на остров Санторини от времевите серии 01.01.2022–01.02.2025 г. на работещите по време на „Роя“ земетресения перманентни GNSS станции SANT, 048A и SANU (Фиг. 5).



Фиг. 5. Резултати от трите компоненти на времевите серии от 01.01.2022–01.02.2025 г. от действащите перманентни GNSS станции SANT, 048A и SANU на остров Санторини

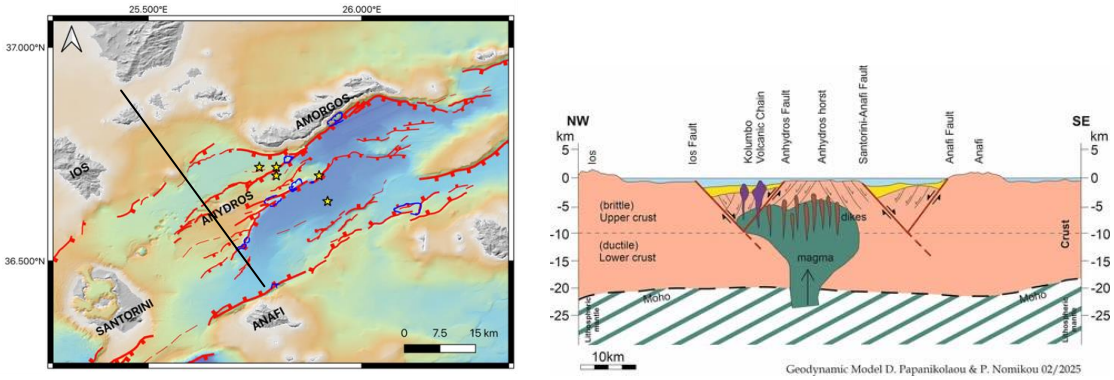
Времевите редове на трите постоянни GNSS станции SANT, 048A и SANU на остров Санторини показаха вертикални движения до 60 mm зо периода 02.07.2024 г.–01.01.2025 г. и хоризонтални премествания от 40 до 60 mm.

Резултатите от GNSS времева серия от Topcon Net-G5 станция, инсталирана за 8 часа от Атинската обсерватория на 12.02.2025 г. на необитаемия остров Анидрос над централната област на „Роя“ земетресения, показа вертикални ондулации до 60 mm и хоризонтални движения до 40 mm за наблюдавания период (Фиг. 6).



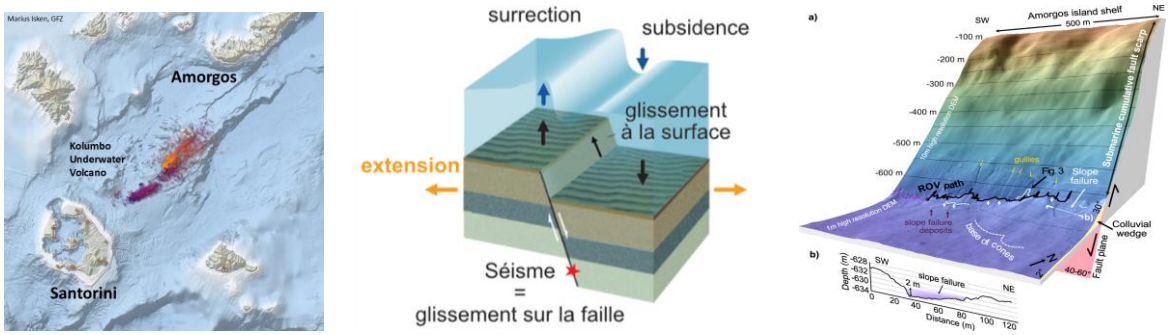
Фиг. 6. Резултати от GNSS мониторинг - времеви серии от Topcon Net-G5 станция, инсталирана на 12.02.2025 г. на необитаемия остров Анидрос, над централната област на „Роя“ земетресения

Резултатите от InSAR и GNSS мониторинг на „Роя“ земетресения на остров Санторини от януари до март 2025 г. са съвместими с геодинамичния модел на „Роя“ земетресения на 50 km от острова (Фиг. 7) и изясняват физическия механизъм на земетресенията.



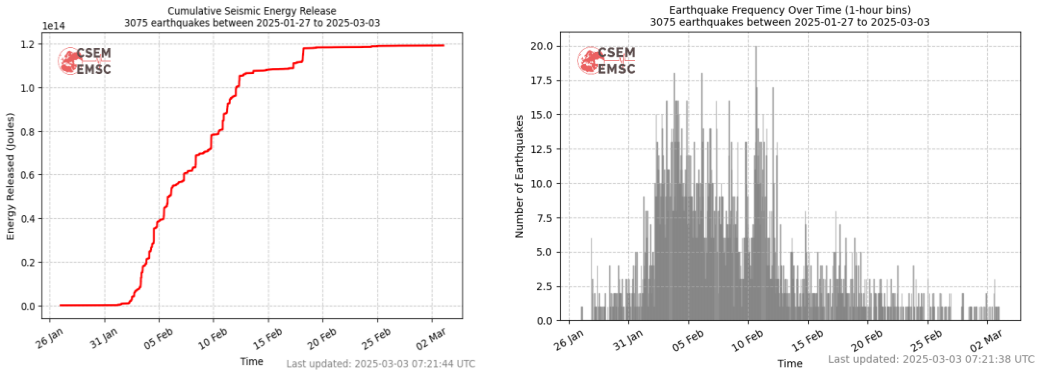
Фиг. 7. Главните разломи в района на „Роя“ земетресенията от 26.01.2025 до 03.02.2025 г. – напречен разрез NW – SE на зоната и връзката на трусовете с главните разломи и вулканичната активност

На Фиг. 8 са представени вулканичната активност в района в план и схеми на тектонския механизъм на „Роя“ земетресения.



Фиг. 8. Вулканичната активност в района, в план и схеми на тектонския механизъм на „Роя“ трусове

По данни от Европейският сеизмологичен център към 15.03.2025 г. при „Роя“ земетресения на остров Санторини от 26.01.2025 до 03.03.2025 г. е освободена огромна енергия 1.2e14 джаула (Фиг. 9а), след което процесите затихват (Фиг. 9б).



Фиг. 9а. Освободената сеизмична енергия при „Роя“ земетресения от 26.01.2025 до 03.03.2025 г. според EMSC е 1.2e14 джаула (Фиг.9а), след което процесите на затихват на 03.03.2025 г. (Фиг. 9б)

Заключение:

Анализът на получените с космически методи InSAR и GNSS ко-сеизмични премествания от „Роя“ трусове на остров Санторини от януари до март 2025 г., се съгласуват със сеизмотектонския модел и изясняват физическия механизъм на земетресенията.

Литература:

1. Briole, Pierre ENS, Paris, France, лични контакти.
2. А. Ганас, Атинска обсерватория, Гърция, лични контакти.
3. EMSC (Евро-средиземноморски сеизмичен център).

SPARC: SPACE-BASED PRECURSORS OF CASCADING MULTI-HAZARD EVENTS IN BULGARIA – CONCEPT AND EXPECTED RESULTS

Lachezar Filchev[1], Garo Mardirossian[1], Boyko Ranguelov[1], Maria Dimitrova[1], Lyubka Pashova[2], Rosen Iliev[1]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: lachezarhf@space.bas.bg

Keywords: *Cascading multi-hazard events, space-based precursors, GNSS, InSAR, terrestrial water storage, early warning*

Abstract: *The concept and expected results of SPARC, a 24-month Bulgarian national project linked to COST Action CA24144 ANTICIPATE, are presented. SPARC integrates GNSS/InSAR-derived ground deformation, GNSS-derived terrestrial water storage, and satellite ecological stress indicators to develop prototype early-warning indicators and a FAIR database of cascading events for Bulgaria. The concept is set against policy documents and scientific literature and compared with European, South-East European and national initiatives.*

SPARC: КОСМИЧЕСКИ-БАЗИРАНИ ПРЕДВЕСТНИЦИ НА КАСКАДНИ МУЛТИ-ХАЗАРДНИ СЪБИТИЯ В БЪЛГАРИЯ – КОНЦЕПЦИЯ И ОЧАКВАНИ РЕЗУЛТАТИ

Лъчезар Филчев[1], Гаро Мардиросян[1], Бойко Рангелов[1], Мария Димитрова[1], Любка Пашова[2], Росен Илиев[1]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките
e-mail: lachezarhf@space.bas.bg

Ключови думи: *Каскадни мултихазартни събития, космически предвестници, GNSS, InSAR, общо водно съдържание в сушата, ранно предупреждение*

Резюме: *Представени са концепцията и очакваните резултати от SPARC – национален проект с продължителност 24 месеца, свързан с COST Action CA24144 ANTICIPATE. Проектът интегрира деформации, определени чрез GNSS и InSAR, GNSS-базирани оценки на общо водно съдържание в сушата и екологични индикатори от спътникови данни, за да се изведат прототипни индикатори за ранно предупреждение и създаде база данни с каскадни събития за България. Концепцията е съпоставена с политики, научна литература и европейски, регионални и национални инициативи.*

Introduction

Natural hazards rarely occur in isolation; more often, they manifest simultaneously or sequentially with subsequent effects. Compound and cascading events, in which one hazard triggers or preconditions another, are a main driver of systemic risk [1–4]. The 2025 UNDRR Global Assessment Report puts direct disaster losses at about USD 202 billion per year. However, when accounting for cascading impacts and macroeconomic ecosystem externalities, the aggregate systemic toll escalates significantly to exceed USD 2.3 trillion.[5]. The European Climate Risk Assessment identifies 36 major climate-induced risks that can cascade across systems and regions [6]. Current predictive modeling frameworks exhibit critical temporal and operational limitations. Forecasting lags behind: short-term forecasts (7–10 days) address single hazards, while experimental extended-range forecasts reach 46 days – the gap that COST Action CA24144 ANTICIPATE (2025–2029) was created to close [7].

This operational agenda is underscored by major international and regional policy frameworks that prioritize systemic risk governance. . Globally, the Sendai Framework 2015–2030 calls for wider availability of multi-hazard early warning systems and comprehensive disaster risk assessment by 2030 [8]. This objective is further amplified by the UN Early Warnings for All (EW4All) initiative, which extends this aim to everyone [9], and by WMO guidelines, which define multi-hazard impact-based forecast and warning services [10]. The Union Disaster Resilience Goals (Recommendation 2023/C 56/01) set five non-binding goals – anticipate, prepare, alert, respond, secure – with a 2027–2030 horizon [11]. At the national level within Bulgaria, these overarching global and European mandates are translated into domestic legislative and strategic instruments. The National Disaster Risk Reduction Strategy 2018–2030 (Council of Ministers Decision No. 505/2018) and Programme 2021–2025 (Decision No. 865/2020), implemented through annual plans under the Disaster Protection Act [12], and the National Climate Change Adaptation Strategy and Action Plan to 2030 (Decision No. 621/2019) [13] carry this agenda. All these national policy documents collectively form a cohesive legal and regulatory framework for multi-hazard risk management.

Recent Bulgarian events show why. In 2024, the European Forest Fire Information System (EFFIS) mapped 45,435 ha burnt across 256 fires – the largest area in over a decade and more than the previous four years combined; two-thirds (29,976 ha) lay in Natura 2000 sites and 48% was agricultural land [14]. In September 2023, Storm Daniel brought 311 mm of rain in about 14 hours at Kosti, roughly four times the normal September total; the Tsarevo flood killed four people and destroyed two bridges [15]. The Mw 5.6 Pernik earthquake of May 22nd 2012, 25 km south-west of Sofia, led to a state of emergency [16]. Such events are typically preceded by slowly evolving states – dry soils and fuels, accumulated crustal strain – that Earth observation (EO) and geodesy can observe.

The scientific basis exists but is fragmented [17, 18]. Frameworks for hazard interactions and compound events are well developed [1, 2, 4]. A pan-European analysis of compound and cascading heatwave–drought–fire hazards covers summers 1990–2018 [19], and fire trends, drivers and warming-driven exacerbation in Mediterranean Europe are documented [18,19]. GNSS vertical displacements respond elastically to hydrological loading and yield regional terrestrial water storage (TWS) [22]; for the severe 2012–2015 Californian drought, GPS indicated a water loss of 57 ± 30 km^3 in the southern Sierra Nevada and San Joaquin mountains against 12 km^3 in hydrological models [23] – a persistent storage deficit that models underestimate, i.e., a physical preconditioning signal. For Bulgaria, the only peer-reviewed GNSS-TWS study known to us used 32 stations (2004–2025) and found an annual amplitude of 10–30 mm (locally above 40 mm) with minimum storage in August–October [24], which coincides with the usual late-summer fire season. Sentinel-1 persistent-scatterer InSAR is now available Europe-wide through the Copernicus European Ground Motion Service (EGMS) [25].

Three critical knowledge and operational deficits persist in current risk assessment frameworks. First, geodetic, hydrological and ecological indicators are analysed separately; to our knowledge, to date, a unified, national-scale preconditioning index that synthesizes these distinct lithospheric, hydrospheric, and biospheric variables remains non-existent for Bulgaria. Second, there is an absence of a curated, empirically verified repository archiving cascading multi-hazard events within the region. The lack of a historical dataset structured in accordance with FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) data principles fundamentally restricts the empirical validation and calibration of predictive preconditioning indicators [26]. Third, existing European Union and regional diagnostic services remain limited by their architecture which is specific to particular hazards or based exclusively on atmospheric factors thereby failing to capture the complex interactions between hazardous hydrometeorological and geodynamic processes. The SPARC initiative directly addresses these systemic vulnerabilities at a national level by deploying open-access datasets and open-source computational tools.

SPARC concept and approach

SPARC is a 24-month Bulgarian national project led by the Space Research and Technology Institute of the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS) and linked to COST Action ANTICIPATE. Its premise is that slow geophysical and ecological processes observable from space precondition hazards and can extend the lead time of early warning beyond what atmospheric forecasts alone provide. SPARC does not aim at operational forecasting; it tests whether space-based precursors add information in three cascade scenarios (Fig. 1): drought → wildfire → ecosystem degradation; prolonged rainfall → landslides → infrastructure damage; and geophysical deformation → activation of natural or technogenic processes.

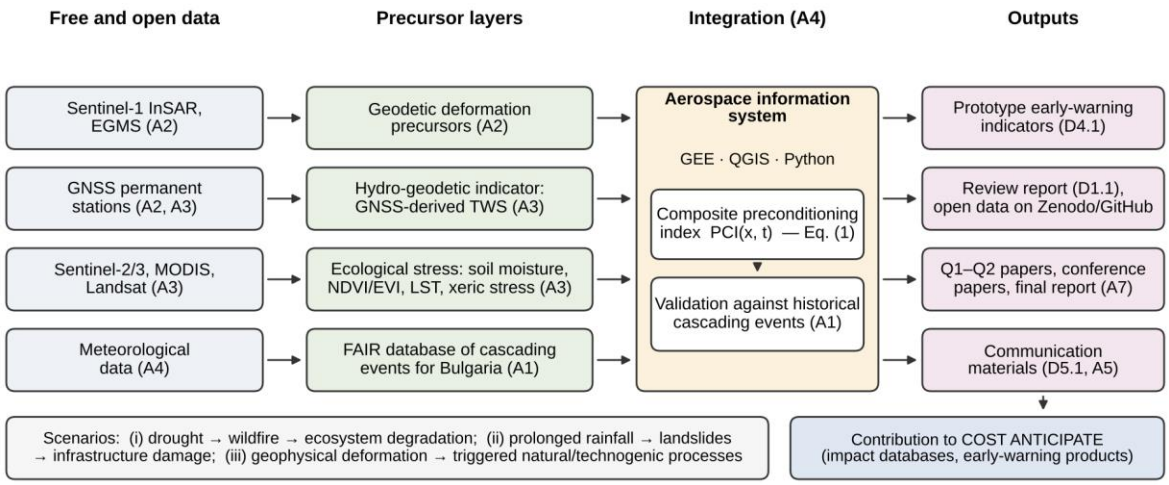


Fig. 1. SPARC concept: data, precursor layers, integration and outputs (A1–A7: activities, Table 1)

Three precursor layers are built solely from free and open data (Sentinel-1/2/3, MODIS, Landsat, EPOS Platform (https://www.ics-c.epos-eu.org/), and national and international GNSS networks). The geodetic layer (A2) processes GNSS time series and Sentinel-1 InSAR in test zones with known seismic, landslide, or deformation activity. The ecological layer (A3) uses soil moisture, vegetation indices (NDVI/EVI), land-surface-temperature anomalies, and xeric-stress indicators from long historical series, complemented by GNSS-derived TWS as a physically based drought indicator. Both are anchored in a database of historical and current cascading events for Bulgaria (A1), with spatial and temporal extents, affected areas, and available observations, and are published on Zenodo/GitHub.

Data management follows the FAIR principles [26]: ISO 19115-compliant metadata, open repositories (Zenodo, GitHub) and quarterly monitoring of data and code deliverables. Free data (Sentinel, GNSS networks) and free infrastructure keep costs low and make the workflow reproducible by other national teams.

The layers are combined in aerospace information systems built on open-source tools (Google Earth Engine, QGIS, Python) (A4). Because a small project cannot deliver a comprehensive methodology, A4 concentrates on practical approaches to co-analyse indicators of different origins and resolutions. The central concept is geophysical and ecological preconditioning: the degree to which prior states of soil, vegetation, water storage and crust raise the probability of a hazardous event. In its simplest candidate form, a composite preconditioning index (PCI) is a weighted sum of standardised anomalies:

(1) $$\mathrm{PCI}(x,t) = \Sigma_k\, w_k\, z_k(x,t), \quad z_k(x,t) = [X_k(x,t) - \mu_k(x,d)] \,/\, \sigma_k(x,d),$$

where X_k is one of K indicators (soil moisture, NDVI/EVI, land-surface temperature, TWS, deformation rate), μ_k and σ_k are its climatological mean and standard deviation for day of year d, and w_k are weights calibrated against the event database. Prototype indicators will be tested in the test zones and evaluated against historical cascading events, e.g. by hit rate and false-alarm ratio. Work is organised in seven activities (Table 1).

Table 1. SPARC activities, timing, and outputs (M – project month)

Activity	Months	Main outputs
A1 Data collection, event database	M1–M6	Event database; systematised indicators; review report D1.1
A2 Crustal movements, deformation precursors	M3–M12	Geodetic precursor set; Q2 article on cascading georisks
A3 Ecological precursors and GNSS-TWS	M4–M14	Ecological-stress indicators incl. TWS; Q1 article (EO-based drought–fire)
A4 Integration in aerospace information systems	M6–M18	Integration approaches; prototype indicators D4.1; Q1–Q2 article(s)
A5 Synthesis, visualisation, dissemination	M12–M24	≥ 2 indexed conference papers; ANTICIPATE report; materials D5.1
A6 ANTICIPATE working groups and meetings	M1–M24	Meeting reports; contributions to joint documents
A7 Q1–Q2 publications	M10–M24	Two Q1–Q2 articles (≥ 1 first-authored by Iliev); final report

Expected results

The outputs in Table 1 fall into four groups. **Data and knowledge repository:** the Bulgarian cascading-event database, a systematised set of space-based geodetic and environmental precursor indicators and a review report (D1.1), scheduled for completion by Project Month 6. **Scientific indicators and indices:** verified geodetic precursors for the designated experimental test zones, an ecological-stress metric indicator set including a hydro-geodetic TWS anomaly index , and a composite multi-hazard preconditioning index. **Functional prototypes:** combined early-warning indicators (D4.1) tested against historical cascades. Peer-reviewed **publications and dissemination:** Research outputs are targeted for high-impact dissemination, including two to three Q1–Q2 journal articles (cascading georisks; EO-based drought–fire analysis with GNSS-TWS; data-integration approaches), at least two papers in Scopus/Web of Science-indexed forums (EGU, IGARSS, ISPRS, Living Planet Symposium), at least one publication first-authored by the early-career researcher, alongside stakeholders' communication materials (D5.1), a collaborative ANTICIPATE report, and a final scientific report.

The expected scientific gain is threefold: (i) a test of whether slow precursors add information on cascade likelihood beyond meteorological indices; (ii) an assessment of GNSS-TWS as a preconditioning indicator, building on the Bulgarian seasonal signal [24]; and (iii) Bulgarian event and indicator data for ANTICIPATE's work on multi-hazard impact databases and early-warning products [7]. In policy terms, the results address the Union Disaster Resilience Goals on anticipation and early warning [11] and can inform the next national disaster risk reduction programme cycle. Added value should be judged against operational benchmarks such as the Standardised Precipitation Index (SPI) and the Fire Weather Index (FWI). An additional value will explore the possibilities of incorporating some of the results obtained into the acting BG-Alert warning system.

Discussion

Table 2 compares SPARC with initiatives outside ANTICIPATE for which key facts could be verified in public sources; unverified initiatives are omitted.

Table 2. SPARC compared with European, South-East European and Bulgarian initiatives (project data: CORDIS [25])

Initiative	Type, period	Scope	Gap addressed by SPARC
MYRIAD-EU	H2020, 2021–2025	Multi-hazard, multi-sector risk framework	No EO/geodetic precursors; no Bulgarian pilot found
MEDiate	Horizon Europe, 2022–2025, EUR 3.55 M	Multi-hazard decision support	No satellite/GNSS precursor layer
CLIMAAX	Horizon Europe, 2023–2026, EUR 20 M	Regional climate-risk toolbox	Scenario risk, not precursors; reusable workflow
FirEURisk, FIRE-RES, SAFERS	H2020, 2020–2025, EUR 2.9–19.9 M	Wildfire risk, management, response	Single hazard; no geodetic or TWS drivers
ANYWHERE	H2020, 2016–2019, EUR 12.0 M	Impact-based warning, weather extremes	Short-range, weather-driven; no geophysical hazards
CASCADES	H2020, 2019–2023, EUR 6.9 M	Cross-border climate-risk cascades	Socio-economic, not physical cascades
Destination Earth	EU Digital Europe, live since 2024	Digital twins: weather extremes, climate	Atmosphere-centered; no solid-Earth component
EFFIS	Copernicus service, JRC	Fire danger (FWI), burnt area	Single-hazard indices; no subsurface water
EGMS	Copernicus LMS, baseline 2015–2020	Sentinel-1 ground motion, Europe-wide	Deformation only; SPARC builds on it
DMCSEE	Regional centre, bulletins since 2010	SE Europe drought (SPI, water balance)	Meteorological drought only
DriDanube	Interreg Danube, 2017–2019, EUR 1.97 M	Drought risk, Drought Watch	No Bulgarian partner; drought only
BG-ALERT	Ministry of Interior, since 2023	Public warning (cell broadcast)	Dissemination only; SPARC is upstream
DRR Programme 2021–2025	Council of Ministers	National risk-reduction activities	Policy instrument; indicators can inform next cycle

European initiatives. MYRIAD-EU and MEDiate develop multi-hazard, multi-risk frameworks and decision support; CLIMAAX offers a climate-risk toolbox; FirEUrisk, FIRE-RES and SAFERS address wildfire risk, management and response; ANYWHERE buildts impact-based warnings for weather extremes; CASCADES addresses socio-economic cascades. None of those reviewed monitors geodetic or hydro-geodetic precursors or builds on a Bulgarian cascade record. Operational services are closest in data: EFFIS provides fire danger and burnt-area maps [14], EGMS provides ground motion [25], and Destination Earth digital twins weather extremes and climate adaptation [28]. These supply hazard-specific indices, whereas SPARC examines the preconditioning states beneath them. The design is complementary: reuse EGMS and Sentinel products, add GNSS-TWS and ecological stress, and test the index against SPI and FWI.

South-East Europe and the Balkans. The Drought Management Centre for South-Eastern Europe (DMCSEE), established in 2007 and hosted by the Slovenian Environment Agency, issues bulletins based on SPI, percentiles and water-balance outlooks [29]. DriDanube (Interreg Danube, 2017–2019, EUR 1.97 M) built drought-watch and user services across ten countries but had no Bulgarian partner [29]. Both are meteorological or drought-only; neither links drought to fire, landslides or deformation. We found no regional system that combines geodesy with ecological EO indicators; other regional programmes could not be verified and are not discussed. A Bulgarian cascade database and precursor set therefore fill a regional and national gaps.

Bulgaria. BG-ALERT, the cell-broadcast public warning system run by the Ministry of Interior since 2023, is a dissemination channel; it was criticised after floods in which no alerts were received, and in April 2025 the Prime Minister ordered it to be fixed [30]. It generates no hazard intelligence. The risk reduction programme and its annual plans (2024: 117 activities, indicative budget of BGN 78 million) are policy instruments, not monitoring systems [12]; no successor programme for the period after 2025 was found in public sources at the time of writing. SPARC therefore sits upstream: its indicators serve the risk-knowledge and monitoring stages on which warning dissemination depends, and its event database can inform the next programme cycle. The Bulgarian GNSS-TWS study [24] shows the approach is feasible with national stations.

Positioning. At all three levels the pattern is consistent: European services deliver hazard-specific indices and forecasts, regional centres deliver meteorological drought monitoring, and national systems deliver warning dissemination and policy frameworks. What is missing is a layer that characterises the slowly varying states that precondition several hazards simultaneously. Because TWS, soil moisture and ground-deformation anomalies evolve over weeks to months, such a layer could in principle support lead times beyond those of medium-range forecasts and thus complement the extended-range forecasts of ANTICIPATE [7]. Whether it does so for Bulgaria is the empirical question SPARC will answer.

Limitations. SPARC's budget is roughly two orders of magnitude below that of the EUR 3.5–20 M projects in Table 2, so its scope is limited to test zones, free data and prototype indicators. GNSS-TWS depends on station density and on separating non-hydrological deformation: the Bulgarian study found weaker agreement between GNSS and model products than among the models themselves, attributed to station distribution and non-hydrological deformation [24]. The EGMS baseline covers 2015–2020 with annual updates [25], and a short event record limits statistical power. Results will therefore be pilot-scale; benchmarking, open data and feedback from the ANTICIPATE network are the main safeguards.

Conclusions

The implementation of the planned research activities under the SPARK project is expected to lead to the systematisation of the multi-hazard risk profile and the identification of existing gaps at the national level, yielding measurable multi-risk indicators to improve multi-hazard risk assessment. More specifically:

- Bulgarian fires, floods and earthquakes combine slow preconditioning with fast triggers; policy calls for anticipation and multi-hazard early warning, yet no national precursor layer exists.
- SPARC integrates GNSS/InSAR deformation, GNSS-derived TWS and EO ecological indicators into a preconditioning index and a FAIR event database for Bulgaria, using free data and open-source tools.
- Expected results: the database, indicator sets, prototype early-warning indicators (D4.1), two to three Q1–Q2 articles, at least two indexed conference papers and input to ANTICIPATE.
- SPARC is complementary to European, regional and national initiatives – an upstream, low-cost layer whose added value must be demonstrated against SPI and FWI benchmarks.

Acknowledgments

This study was nationally co-funded by the project “SPace and Ground Technologies for Studying Cascading Multi-hazard Events – models, Applications, PreCursors (SPARC)”, supported under Co-funding Contract No. KP-06-COST / 23 / dated 18 August 2026, concluded between the Space Research and Technology Institute at the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS) and the Bulgarian National Science Fund (BNSF) within the framework of BNSF-1.009 – “Procedure for Providing National Co-funding for the Participation of Bulgarian Research Teams in Established Actions in Science and Technology.

References:

1. Gill, J. C., B. D. Malamud. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. Reviews of Geophysics, 52(4), 2014, pp. 680–722. doi:10.1002/2013RG000445
2. Zscheischler, J., O. Martius, S. Westra et al. A typology of compound weather and climate events. Nature Reviews Earth & Environment, 1(7), 2020, pp. 333–347. doi:10.1038/s43017-020-0060-z
3. de Ruiter, M. C., A. Couasnon, M. J. C. van den Homberg et al. Why we can no longer ignore consecutive disasters. Earth's Future, 8(3), 2020, e2019EF001425. doi:10.1029/2019EF001425
4. Ward, P. J., J. Daniell, M. Duncan et al. Invited perspectives: A research agenda towards disaster risk management pathways in multi-(hazard-)risk assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences, 22(4), 2022, pp. 1487–1497. doi:10.5194/nhess-22-1487-2022
5. UNDRR. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2025: Resilience Pays – Financing and Investing for Our Future. Geneva, 2025. https://www.undrr.org/gar/gar2025
6. European Environment Agency. European Climate Risk Assessment. EEA Report 01/2024, Copenhagen, 2024. doi:10.2800/8671471
7. COST Association. CA24144 – ANTICIPATE: Extended-range multi-hazard predictions and early warnings (MoU 053/25). https://www.cost.eu/actions/CA24144/
8. UNDRR. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva, 2015. https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030
9. WMO. Early Warnings for All: The UN Global Early Warning Initiative for the Implementation of Climate Adaptation. Geneva, 2022. https://library.wmo.int/idurl/4/58209
10. WMO. WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services (WMO-No. 1150), Part I, 2015; Part II: Putting Multi-hazard IBFWS into Practice, 2021. Geneva.
11. European Commission. Commission Recommendation of 8 February 2023 on Union disaster resilience goals (2023/C 56/01). Official Journal of the European Union, C 56, 15.2.2023.
12. Council of Ministers of Bulgaria. National Disaster Risk Reduction Programme 2021–2025 (Decision No. 865/26.11.2020); Annual Plan for 2024 (Decision No. 413/17.06.2024). https://www.strategy.bg/strategicdocuments/View.aspx?lang=bg-BG&Id=1279
13. Ministry of Environment and Water of Bulgaria. National Climate Change Adaptation Strategy and Action Plan to 2030 (Council of Ministers Decision No. 621/25.10.2019). https://www.moew.government.bg/en/climate/international-negotiations-and-adaptation/adaptation/
14. San-Miguel-Ayanz, J. et al. Advance report on forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2024. EUR 40255, JRC141505, Publications Office of the EU, 2025. doi:10.2760/1264626
15. BTA. Wrap-up: Tsarevo floods leave behind four casualties and serious damage to infrastructure. 6 September 2023. https://www.bta.bg/en/news/bulgaria/518186; FloodList. Bulgaria – Storm Daniel floods, September 2023 (update). https://floodlist.com/europe/bulgaria-floods-september-2023-update
16. EMSC. M 5.6 Bulgaria on May 22nd 2012. https://m.emsc-csem.org/Special_reports/?id=210
17. Pashova, L.; Kouteva-Guentcheva, M.; Bandrova, T. Towards Mapping Multi-Hazard Vulnerability of Natural Disasters for the Bulgarian Territory. In Proceedings of the 6th International Conference on Cartography and GIS, Albena, Bulgaria, 13–17 June 2016; Bandrova, T., Konecny, M., Eds.; Bulgarian Cartographic Association: Sofia, Bulgaria. Available online: https://cartography-gis.com/docsbca/iccgis2016/ICCGIS2016-85.pdf (accessed on 12 September 2026).
18. Ghawana, T.; Pashova, L.; Zlatanova, S. Geospatial Data Utilisation in National Disaster Management Frameworks and the Priorities of Multilateral Disaster Management Frameworks: Case Studies of India and Bulgaria. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2021, 10, 610, https://www.mdpi.com/2220-9964/10/9/610
19. Sutanto, S. J., C. Vitolo, C. Di Napoli, M. D'Andrea, H. A. J. Van Lanen. Heatwaves, droughts, and fires: Exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale. Environment International, 134, 2020, 105276. doi:10.1016/j.envint.2019.105276
20. Jones, M. W., J. T. Abatzoglou, S. Veraverbeke et al. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. Reviews of Geophysics, 60(3), 2022, e2020RG000726. doi:10.1029/2020RG000726
21. Turco, M., J. J. Rosa-Cánovas, J. Bedia et al. Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. Nature Communications, 9, 2018, 3821. doi:10.1038/s41467-018-06358-z
22. Argus, D. F., Y. Fu, F. W. Landerer. Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion. Geophysical Research Letters, 41, 2014, pp. 1971–1980. doi:10.1002/2014GL059570

23. Argus, D. F., F. W. Landerer, D. N. Wiese et al. Sustained water loss in California's mountain ranges during severe drought from 2012 to 2015 inferred from GPS. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(12), 2017, pp. 10559–10585. doi:10.1002/2017JB014424
24. Ansari, K., E. Tanır Kayıkçı, L. Pashova. Terrestrial water storage monitoring in Bulgaria using Global Navigation Satellite System (GNSS) displacements and comparison with GLDAS, GLWS and GRACE products. Environmental Earth Sciences, 85(14), 2026, 345. doi:10.1007/s12665-026-13067-0
25. Crosetto, M., L. Solari, J. Balasis-Levinsen et al. Deformation monitoring at European scale: The Copernicus Ground Motion Service. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B3-2021, pp. 141–146. https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B3-2021/141/2021/
26. Wilkinson, M. D., M. Dumontier, I. J. Aalbersberg et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data, 3, 2016, 160018. doi:10.1038/sdata.2016.18
27. CORDIS, European Commission. Project records: MYRIAD-EU (GA 101003276), MEDiate (101074075), CLIMAAX (101093864), FirEUrisk (101003890), FIRE-RES (101037419), SAFERS (869353), ANYWHERE (700099), CASCADES (821010). https://cordis.europa.eu/project/id/<GA number>
28. ECMWF. EU's Destination Earth Phase II inaugurated. 2024. https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2024/eus-destination-earth-phase-ii-inaugurated
29. DMCSEE. Drought Management Centre for South-Eastern Europe – Monitoring. https://www.dmcsee.org/monitoring; Interreg Danube Transnational Programme. DriDanube – Drought Risk in the Danube Region. https://dtp.interreg-danube.eu/approved-projects/dridanube
30. Sofia Globe. Bulgaria's PM orders get BG-ALERT system working. 30 April 2025. https://sofiaglobe.com/2025/04/30/bulgarias-pm-orders-get-bg-alert-system-working/; BTA. PM Zhelyazkov: BG-ALERT system proves operational and effective. 2025. https://www.bta.bg/en/news/bulgaria/979963

CASCADE MULTIRISK EVENTS – CAUSES, ORIGIN, INTERACTIONS

Garo Mardirossian, Boyko Ranguelov

Space Research and Technology – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: garo.mardirossian@gmail.com, branguelov@gmail.com

Key words: *Cascade disasters, Multirisk, Catastrophic events, Origin, Examples*

Abstract: *Cascade disastrous events are in the focus of the scientific community because they produce heavy consequences to the society and are very difficult to be modeled and the risks they produced to be assessed and managed. The multirisks are caused by consecutive hazard events which triggered each other. What is important to mention is the fact that the damages they produced are not a simple sum of the damages produced by the separate hazards. This means that the strong nonlinearity is in fact and are dominant modes regarding these events. There are two separated groups of multirisk events: the first one – consecutive events triggered by each other. The second groups are occasional cases of coincidence of events which neither are nor interrelated but occasionally happening in the (approximately) same time. We deal with the risk assessment qualitatively by convolution of hazard, vulnerability, exposure and coping capacity and illustrate this by several heavy powerful events worldwide observed multihazard and multiurisk case studies. This work is part of the COST- SPARC Project.*

КАСКАДНИ МУЛТИРИСКОВИ СЪБИТИЯ – ПРИЧИНИ, ПРОИЗХОД, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Гаро Мардиросян, Бойко Рангелов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: garo.mardirossian@gmail.com, branguelov@gmail.com

Ключови думи: *Каскада, Мултириск, Катастрофални събития, Произход, Примери*

Резюме: *Каскадните катастрофални събития са във фокуса на вниманието на научната общност, тъй като водят до тежки последици за обществото, а моделирането им, както и оценката и управлението на свързаните с тях рискове, са изключително трудни. Мултирисковите сценарии възникват в резултат на поредица от опасни събития, които се провокират последователно. Важно е да се отбележи, че щетите от тях не представляват просто сбор от щетите, причинени от отделните опасности поотделно; това означава, че при тези събития доминираща роля играе силната нелинейност. Разграничават се две групи мултирискови събития: първата обхваща последователни събития, които се задействат едно друго, а втората включва случаи на съвпадение на събития, които не са взаимно свързани, но се случват приблизително по едно и също време. В настоящата работа оценката на риска се извършва качествено чрез комбиниране (конволюция) на компонентите опасност, уязвимост, изложеност и капацитет за справяне, като подходът е илюстриран чрез примери за мащабни събития от цял свят, свързани с множествени опасности и рискове. Тази разработка е част от проекта COST-SPARC.*

Introduction

Public interest in cascading risk processes is growing in parallel with urbanization. Until a few decades ago (less than a century), population density (especially outside highly urbanized areas) was negligible in the risk-prone regions of the world. In past historical times and in antiquity, major natural cataclysms were recorded in historical annals, but they never had such a destructive effect as in recent decades [1]. As population density increases, an increasing number of disaster events of lesser magnitude affect society and trigger increasingly severe consequences. While well-established risk assessment models exist for all individual disaster events (e.g., earthquakes, tsunamis, floods, fires,

landslides, frosts and ice storms, avalanches, hurricanes, and many more [2]), multi-risk cascading disasters prove quite difficult to model and, despite the rapid development of technology, cannot yet be evaluated with sufficient accuracy. This also poses a challenge for early warning systems, which are becoming increasingly sophisticated and effective. Assessing risk in multi-risk cascading disasters presents a particular difficulty due to their extremely low predictability. This necessitates a modern approach for the quantitative assessment of multi-risk cascading events (especially the most powerful ones). Despite the rapid development of artificial intelligence, there is still no unified algorithm for multi-risk assessment in cascading disasters and its integration into early warning systems.

Definitions and Methodology

Cascading risk events (or cascading effects) are a series of events in which an initial hazard or incident triggers a chain of subsequent events, where each succeeding event is a direct consequence of the preceding one. This phenomenon is often described as a "domino effect" or a "butterfly effect" and is a key concept in risk management, systems engineering, and ecology [3].

It is important to note that risk, according to the UN definition, represents a convolution between hazard, vulnerability, exposure, and societal resistance. It is this last factor that most frequently determines the capabilities for counteracting risk phenomena and processes [4].

Hazards can be natural or anthropogenic. A hazard is a phenomenon or process that threatens the life and health of the population, infrastructure, and human-made material assets.

Vulnerability indicates how severely a given system can be disrupted by a hazard.

Exposure is a parameter that quantitatively demonstrates how vulnerable a given system is.

Societal resistance (called Coping capacity) describes society's readiness to cope with the consequences of a hazard's impact combined with vulnerability and exposure.

Mathematically, this is expressed as the convolution * of the described parameters, or:

(1) $R = H * V * E * C$

*(Note: Using the acronyms: Risk = Hazard * Vulnerability * Exposure * Coping capacity)*

- Convolution is an operation in which all possible combinations of the considered parameters are calculated and the inverse probability is derived, insofar as the entire mathematical formulation is based on a probabilistic approach.

Implied, and the interactions between sequences of negative events are defined.

Sometimes, multi-risk events are defined not only as sequences of triggering each subsequent type of disaster phenomenon, but also as situations where events of different genesis occur in parallel, compounding negative effects as they unfold concurrently or close in time. This frequently leads to troubles in the Early Warning Systems regarding their effectiveness [5].

In practice, almost every natural disaster has a platform developed for risk assessment and Often, the first three parameters carry the negative component and are usually summed with a positive sign (+), while Coping capacity (C) reduces the overall risk and is subtracted from the resulting sum.

Normally, in determining multi-risk, cascading hazard effects (natural and/or anthropogenic) are calculation.

This is not the case with cascading disasters. Insofar as the problem is ill-defined, depends on many factors and nonlinearities, and is difficult to formalize, existing simulation models are usually limited to two consecutive, mutually conditioned hazardous events [5].

Multi-risk represents the overall risk from natural and anthropogenic hazards characteristic of a given area of observation or study. It is also often called complex risk.

The concept of multi-risk is based on the fact that most hazards are not isolated hazards in themselves, but are interconnected, with this connection often being very strong. Consequently, the total negative effect is much greater than the sum of the effects of individual hazards. This has been proven both theoretically and through numerous case observations and statistical analysis [4].

It is important to note that negative effects are often subdivided into primary (generated by the processes of hazard inception themselves) and secondary—impacts resulting from the disruption of societal systems relative to their normal functioning under non-critical situations, rather than under disaster conditions.

Usually, more powerful disasters are accompanied by more severe secondary effects, although this rule often has exceptions [4].

The main characteristics of cascading multi-risks are:

- **Scale multiplication:** The consequences of a cascade are often much larger and more destructive than the initial single incident.
- **Systems complexity:** They manifest in highly interconnected systems (critical infrastructure, ecosystems, financial markets) where elements depend on one another.

- **Difficulty in forecasting:** Due to the non-linear nature of connections, accurately predicting the final outcome is extremely difficult, making developed models for multi-risk assessment and management largely ineffective.

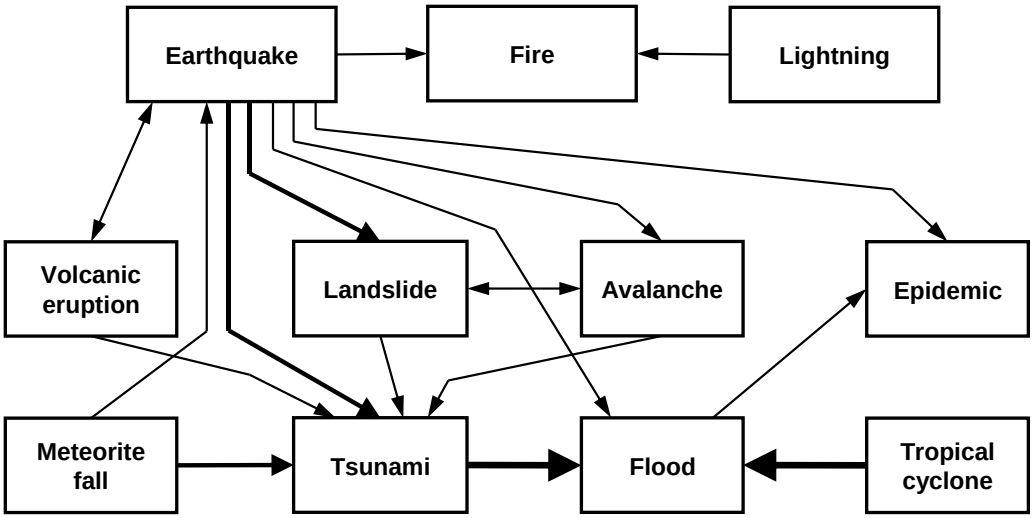


Fig. 1. Connections between different natural disasters.
The thickness of the arrows indicates the strength of the connection.

Interconnections and interactions exist between individual natural disasters and eco-catastrophes. A number of catastrophic processes can either directly generate other types of eco-catastrophes or create preconditions for them.

Chains of cascading events (illustrative examples: EARTHQUAKE, VOLCANO, etc.)

- **PAIRS:** Earthquake – landslide (onshore and/or submarine), earthquake – aftershocks, earthquake – tsunami, earthquake – volcanic eruption, earthquake – rockfall, earthquake – surface deformations and ruptures, earthquake – soil liquefaction, earthquake – avalanche (icefall), etc.
- **TRIPLETS:** Earthquake – landslide – tsunami, earthquake – volcanic eruption – tsunami, earthquake – deformations – tsunami, earthquake – icefall – tsunami, earthquake – soil liquefaction – landslide, etc.
- **QUADRUPLETS:** Earthquake – volcanic eruption – landslide – tsunami, etc.

This type of cascading risk phenomena cannot be unified by a single formula, despite the mathematical formalization of the phenomenon, because the problem is multi-parametric with many unknown parameters.

Some global examples

Table 1

Chain of disasters	**Location and initial source**	***Negative effects***	***Preceding events***	***Future expectations and Potential Early warnings***
Earthquake – tsunami	Lisbon, 1755. (Source in Atlantic Ocean)	Widespread destruction and flooding in many areas along European coasts	Earthquake felt several hours earlier	Yes, Early Warning System deployed.
Earthquake – volcano	Hawaii, 1975. Earthquakes preceded volcanic eruption of Mauna Loa	Powerful volcanic eruption	Earthquake swarm activated several months earlier	Yes, Early Warning System deployed.

Chain of disasters	**Location and initial source**	***Negative effects***	***Preceding events***	***Future expectations and Potential Early warnings***
Earthquake – tsunami	Indonesia, 2004. Extreme tsunami generated by powerful earthquake (M9.0)	Four continents, 12 countries affected, about 300,000 deaths and 1 million homeless people	No preliminary signals detected	Yes, Early Warning System deployed.
Volcano – tsunami	Krakatoa, 1883. Extreme tsunami generated by explosive volcanic eruption	20-meter tsunami struck Batavia (Jakarta) and surrounding coasts	Earlier seismic activity	Yes, Early Warning System deployed.
Volcano – landslide – tsunami	Anak Krakatau, 2018, Sunda Strait. Collapse of volcano flank built up by earlier eruption generated local tsunami	Severe Destruction and more than 3,000 deaths	Preliminary models predicted the consequences	Yes, Early Warning System deployed.
Earthquake – icefall – landslide – tsunami	Lituya Bay, 1958, Alaska. Megatsunami generated by earthquake-triggered rock/icefall	Glacier fall and landslide produced a huge tsunami (525 meters)—the highest in recorded history	Witnesses observed the collapse	No
Earthquake – flood	Mississippi, 1811	Missouri, flooded 500 km^2	Flooding started hours later	No
Glacier fall – mud flow – flooding	Nepal, 2026, Himalayas. Melted ice produced mud flow (~20 meters) and extensive flooding in lowlands	About 3,000 deaths. Secondary lake formed due to debris, preventing extensive rescue operations for some time	No preliminary signals detected	Yes, EWS intended
Hurricane – storm surge – flood – rip currents – tornadoes	New Orleans, Louisiana. Hurricane Ida generated storm surges, flood intrusion, strong rip currents, and tornadoes	112 deaths, over several hundred injured, many houses destroyed, tornadoes generated	Satellite tracking several days earlier showed possible path. Evacuation performed	Yes, Early Warning System works.
Earthquake – avalanche – mud flows – flood	Huascarán, Peru, 1970. Produced avalanche transformed into mud flows and flooding in lower areas	About 30,000 deaths, 1 town and 30 villages completely destroyed	No preliminary signals detected	No
Meteorological disturbance – meteotsunami – rip currents	Odesa, 2014	Beaches flooded, panic and rumors	No preliminary signals detected	No

Undoubtedly, the most typical example of such a chain event is an earthquake. It can generate a tsunami, trigger landslide processes, induce a volcanic eruption, serve as a release mechanism for snow avalanches, cause flooding due to dam failure, and so on [6]. Figure 1 schematically illustrates the connections between different natural eco-catastrophes.

As seen from the figure, earthquakes generate the most severe cascading multi-risks. One of the most serious cascading hazards is a tsunami, for which there are numerous historical examples with terrible consequences [7].

Analysis of Results

Just as with natural hazards and eco-catastrophes, secondary effects often have a comparable and sometimes even greater negative impact than the triggering phenomenon itself, and the primary hazard often leads to multiple secondary hazards with much higher destructive potential than that of the original hazard alone. Characteristic examples of this include the Lisbon earthquake of November 1755 and the Great Kantō fire in Japan. In Lisbon, the number of people drowned by the tsunami was comparable to those killed under the rubble numbering in the thousands. The number of victims burned in the Kantō fire of 1923 was many times greater than those who died as a direct result of the earthquake itself. Same was observed in Philippines [9].

Lightning is also one of the most common causes of wildfires, fires in barns and storage rooms with flammable materials, and, less frequently, in residential buildings. Globally, lightning accounts for about 5% of these fires. Statistics show that every year in the US, about 10,000 forest and field fires are caused by lightning. Fires also frequently occur in urban agglomerations, for example following an earthquake. A typical example is the seismic event in Kobe, Japan, where damage from fires exceeded that from ground shaking.

A landslide also triggered the major ecological disaster at the Vajont Dam on the river of the same name, a tributary of the Piave River in Italy. On October 9, 1963, a landslide of approximately 250 million/m^3 detached from the southern side of the valley and collapsed into the reservoir basin. As a result, a massive water wave was generated, exceeding the height of the dam crest by about 100 m. The surge swept down the valley, destroying five settlements and killing nearly 3,000 people.

There is also an interesting question that does not seem to receive sufficiently serious attention: whether the cumulative negative consequences of several smaller disasters equal the impacts of a single severe (catastrophic) disaster event. If this question were to be answered immediately, the answer is a definitive NO. There are many examples supporting this statement. For instance, it is impossible for several minor earthquakes to trigger the entire spectrum of negative effects associated with a single major earthquake. The effects of the latter are highly diverse crustal ruptures, landslide generation, tsunamis, ground liquefaction, etc. None of these effects can be produced as the cumulative result of a series of weak earthquakes [8]. Similarly, a series of small tsunamis occurring along the coasts of the Indian Ocean cannot reproduce the impact of a single giant wave, such as the one in December 2004, because low-magnitude tsunamis cannot propagate across an entire ocean and instead concentrate their energy only on nearby shores. It is likewise obvious that the destruction and damage caused by a single powerful hurricane are never the same as those from several smaller ones.

As with any rule, there are some exceptions here as well. For example, several small avalanches can displace as much snow in total as one larger avalanche. Several small wildfires can collectively destroy an area equivalent to that destroyed by a single large-scale fire. A series of droughts can ruin crops just as a larger one would… However, if all these series of small-scale disasters are spaced sufficiently far apart in time, the cumulative negative effect would be significantly mitigated.

Conclusion

Definitions of risk and cascading multirisks are presented with examples of generating disastrous events and observed negative consequences. The analysis shows clear nonlinear behavior of cascading multirisks which means difficulties in modeling and management. Troubles are expected in the early warning systems alerting the society about threats. All these difficulties need new complex algorithm to solve problems. This could be achieved by using AI and modern space technologies.

Acknowledgment

This study was nationally co-funded by the project “Space and Ground Technologies for Studying Cascading Multi-hazard Events – models, Applications, Precursors (SPARC)”, managed by Prof. Lachezar Filchev, and supported under Co-funding Contract No. KP-06-COST / 23 / dated 18 August 2026, concluded between the Space Research and Technology Institute at the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS) and the Bulgarian National Science Fund (BNSF) within the framework of BNSF-1.009 – “Procedure for Providing National Co-funding for the Participation of Bulgarian Research Teams in Established Actions in Science and Technology.”

References:

1. Мардиросян Г. Природни бедствия и екологични катастрофи – изучаване, Превенция, Защита. Издателство на БАН „Проф. М. Дринов“, 2024, 353 с. ISBN 978-619-245-452-4.
2. Мардиросян Г., Б. Рангелов, А. Близнаков. Природни бедствия – Възникване, Причини, Защита. Авит консулт, 2011, с. 170, ISBN 978-954-92214-2-8.
3. Ranguelov B., 2013, Risk profiles and hazards for the Black Sea area. In Landslide Science and Practice, Vol. 7: Social and Economic Impact and Policies (Editors: Claudio Margottini, Paolo Canuti, Kyoji Sassa), ISBN: 978-3-642-31312-7, (Print) 978-3-642-31313-4 (Online). DOI 10.1007/978-3-642-31313-4, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. pp. 3–9.
4. Ranguelov B., 2011. Natural Hazards – nonlinearities and assessment. Acad. Publ. House (BAS), ISBN 978-954-332-419-7, pp. 327.
5. Ranguelov B., A. Frantsova, 2017. Multihazards early warnings. Research, models and Bulgarian expertise. LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, 224 pp. ISBN: 978-620-2-07727-9 https://www.morebooks.de/store/gb/book/multihazard-early-warnings/isbn/978-620-2-07727-9
6. Frantzova A, Ivanov P, Dobrev N, Berov B, Nankin R, Krastanov M, Ranguelov B (2024) Rethinking the landslide risk assessment for socio-ecological systems using the example of the northern Bulgarian Black Sea coast. ISSN 2367-8194, One Ecosystem 9: e136166. pp. 1–28, https://doi.org/10.3897/oneeco.9.e136166 ; https://oneecosystem.pensoft.net/article/136166/.
7. Lyubka Pashova, Boyko Ranguelov, 2023. Tsunami Research In Bulgaria – Gaps, Challenges, And Future Research Directions, IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG), e-ISSN: 2321–0990, p-ISSN: 2321–0982.Volume 11, Issue 5 Ser. I (Sept.–October. 2023), 36–41, www.iosrjournals.org, DOI: 10.9790/0990-1105013641 www.iosrjournals.org 36 | Page https://www.researchgate.net/publication/374413687_Tsunami_Research_In_Bulgaria_-_Gaps_Challenges_And_Future_Research_Directions
8. Boyko Ranguelov, Ruben Paul Borg, Rumiana Glavcheva, Edelways Spassov, Fathimath Shadiya., 2022. NATURAL HAZARDS: A GUIDE FOR THE SAFETY OF PEOPLE AND PROPERTY., XXXII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODERN TECHNOLOGIES, EDUCATION AND PROFESSIONAL PRACTICE IN GEODESY AND RELATED FIELDS, Sofia, 02 – 04 November 2022. 156–167. https://symp2022.geodesy-union.org/wp-content/uploads/2023/01/XXXII_SympSGZB-Proceedings.pdf
9. Marlon Era, Edgar Vallar, Abdul Jhariel Osman, Ruben Paul Borg, Glorianne Borg Axisa, Ignacio Aguirre Ayerbe, Maria Merino Gonzalez-Pardo, Boyko Ranguelov, A Baseline Assessment of the Multi-Hazard Early Warning Systems in the Province of Batangas, Philippines., Int. J. on Advanced Science Engineering Information Technology, Vol. 12 (2022) No. 2, pp. 621–626. ISSN: 2088-5334.

ПЕРСПЕКТИВИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ГЕОПРОСТРАНСТВЕНИ ПЛАТФОРМИ ЗА РЕГИОНАЛЕН МОНИТОРИНГ НА ОПАСНИ ЯВЛЕНИЯ: ОПИТЪТ С ORACLE AEROSPACE SHIELD

Стефан Шопов, Гаро Мардиросян, Мария Димитрова, Павлин Граматиков

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: stefan.shopov@space.bas.bg

Ключови думи: *дистанционни изследвания, оценка на риска, горски пожари, свлачища, наводнения, Copernicus, FWI, БЛА, изкуствен интелект*

Резюме: *Статията представя геопространствената платформа Oracle Aerospace Shield за регионална оценка на опасността от наводнения, свлачища и горски пожари в Европа. Платформата съчетава спътникови данни от Copernicus (Sentinel-1 и Sentinel-2), метеорологичен реанализ ERA5, цифров модел на релефа и климатична класификация по Кьопен-Гайгер в двупроходен конвейер, достъпен като уеб услуга. Описани са три физически обосновани модела: прагове „интензитет-продължителност“ за свлачища, комбиниран валежно-спектрален индекс за наводнения и верижно изчислен канадски индекс FWI за пожари, коригиран с NDVI. Резултатите за Тесалия (Гърция) през сезона на 2026 г. са сравнени с наблюденията на EFFIS и NASA FIRMS, като се подчертава разликата между опасност и реално възникване. Обсъдени са перспективите за включване на данни от безпилотни летателни апарати (БЛА) и методи на изкуствения интелект.*

PROSPECTS FOR THE USE OF GEOSPATIAL PLATFORMS FOR REGIONAL MONITORING OF HAZARDOUS PHENOMENA: THE EXPERIENCE WITH ORACLE AEROSPACE SHIELD

Stefan Shopov, Garo Mardirossian, Maria Dimitrova, Pavlin Gramatikov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: stefan.schopov@gmail.com

Keywords: *remote sensing, risk assessment, wildfire, landslide, flood, Copernicus, FWI, UAV, artificial intelligence*

Abstract: *The paper presents Oracle Aerospace Shield, a geospatial platform for regional assessment of flood, landslide and wildfire hazard in Europe. It combines Copernicus Sentinel-1/2 imagery, ERA5 reanalysis, a digital elevation model and the Köppen-Geiger climate classification in a two-pass pipeline delivered as a web service. Three physically based models are described: rainfall intensity–duration thresholds for landslides, a combined precipitation-spectral index for floods, and a chained Canadian Fire Weather Index adjusted by NDVI. Results for Thessaly (Greece) in the 2026 season are compared with EFFIS and NASA FIRMS observations, highlighting the difference between hazard and actual occurrence. Prospects for integrating unmanned aerial vehicle (UAV) data and artificial intelligence are discussed.*

Въведение

През последното десетилетие Европа преживява все по-чести и по-разрушителни природни бедствия. Горските пожари в Средиземноморието обхващат стотици хиляди хектари годишно, а сезонът им се удължава и измества на север. Интензивните валежи предизвикват внезапни наводнения и свлачища, както показаха бурята „Даниел“ в Тесалия (2023 г.) и наводненията в Централна Европа (2024 г.). Тези явления засягат и България, където пожарите в Южна България и свлачищата по Черноморието и в Предбалкана са постоянен проблем за местните власти. Аерокосмическите технологии отдавна са утвърден инструмент за изучаване,

наблюдение и защита от природните бедствия [1], а системите за ранно предупреждение, например за наводнения под язовирни стени, са важна част от защитата на критичната инфраструктура [2].

Спътниковото наблюдение на Земята вече предлага безплатни и редовни данни с висока разделителна способност. Програмата Copernicus осигурява оптични изображения от Sentinel-2 и радарни изображения от Sentinel-1, а реанализът ERA5 дава последователни метеорологични полета от 1940 г. насам. Европейските оперативни услуги, като Европейската информационна система за горски пожари (EFFIS) [3] и Copernicus EMS, използват тези данни за наблюдение в континентален мащаб. В ИКИТ-БАН има дългогодишен опит в регистрирането на наводнения и пожари на територията на България по спътникови данни и в изграждането на тематични бази от спътникови данни за екологичен мониторинг [4–6]. На регионално и местно ниво обаче липсват лесни за използване инструменти, които обединяват няколко вида опасност, работят за произволна точка и обясняват резултата си.

Целта на статията е да представи методологията на платформата Oracle Aerospace Shield, която запълва тази празнина, и да оцени доколко нейните резултати съответстват на реални наблюдения. Платформата работи като публична уеб услуга на адрес oracleaerospaceshield.com: потребителят избира точка на картата на Европа и период, а системата връща оценка на опасността от наводнение, свлачище и горски пожар с обяснение на факторите. В раздел 2 са описани данните и архитектурата, в раздел 3 – моделите за оценка на опасността, в раздел 4 – пример за валидация с реални наблюдения, а в раздел 5 – перспективите за развитие чрез безпилотни летателни апарати (БЛА) и методи на изкуствения интелект.

Данни и архитектура

Източници на данни

Платформата използва само данни от открити източници. Спътниковите и климатичните продукти се обработват в облака чрез Google Earth Engine [7], а дневните метеорологични редове се взимат от архива на Open-Meteo [8], който се базира на ERA5 [9]. Оптичните и радарните данни са от мисиите Sentinel-2 [10] и Sentinel-1 [11], релефът е от SRTM [12], а наблюденията на пожари са от NASA FIRMS [13] и EFFIS. Данните от мисиите Sentinel се използват в ИКИТ-БАН и за други задачи на екологичния мониторинг, например за оценка на замърсяването на въздуха [14]. Използваните източници са обобщени в табл. 1.

Таблица 1. Източници на данни

Източник	**Продукт**	**Използване**
Sentinel-2 L2A	NDVI, NDWI	растителност, повърхностни води
Sentinel-1 GRD	обратно разсейване VV, dB	залети площи, влажност
ERA5 / ERA5-Land	валеж, температура, влажност, вятър, почвена влага	тригери за всички опасности
SRTM, 30 m	наклон, надморска височина	свлачища, наводнения
WorldClim [15]	месечни климатични норми	класификация по Кьопен–Гайгер
NASA FIRMS, EFFIS	активни огнища, опожарени площи	валидация, слоеве на картата
NASA GLC [16], Copernicus EMS	исторически събития	сравнение с минали случаи

Предварителна обработка

Анализът се извършва в кръгова зона с радиус 1 km около избраната точка. От Sentinel-2 се избира изображението с най-малка облачност за периода, при условие че тя е под 20%. Ако за периода няма подходящо изображение, търсенето се разширява до 90 дни назад с праг 50%. От него се изчисляват нормализираният вегетационен индекс NDVI [17] и водният индекс NDWI [18]:

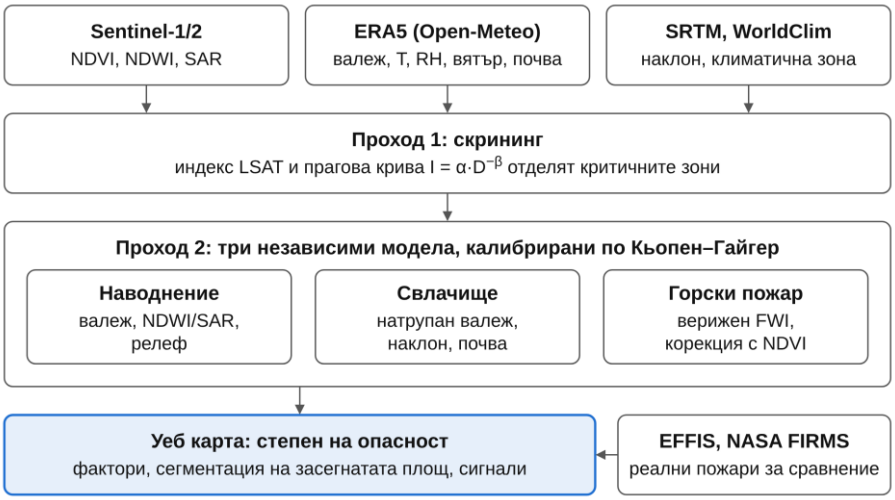
(1) $$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}},$$

където ρ е отражателната способност в каналите B8 (близък инфрачервен), B4 (червен) и B3 (зелен). Вместо средната стойност за зоната се взима най-неблагоприятната ѝ част: 10-ият персентил на NDVI (най-сухата растителност) и 90-ият персентил на NDWI (най-наситената с вода площ). По същата логика от Sentinel-1 се взима последното изображение в режим IW с поляризация VV и 90-ият персентил на обратното разсейване при 10 m, а от SRTM – 90-ият персентил на наклона и минималната надморска височина, където се събира водата.

Метеорологичният ред съдържа дневен валеж, максимална температура, минимална относителна влажност, скорост на вятъра в m/s и почвена влага. За пожарния индекс редът започва 60 дни преди избрания период (раздел 3.4).

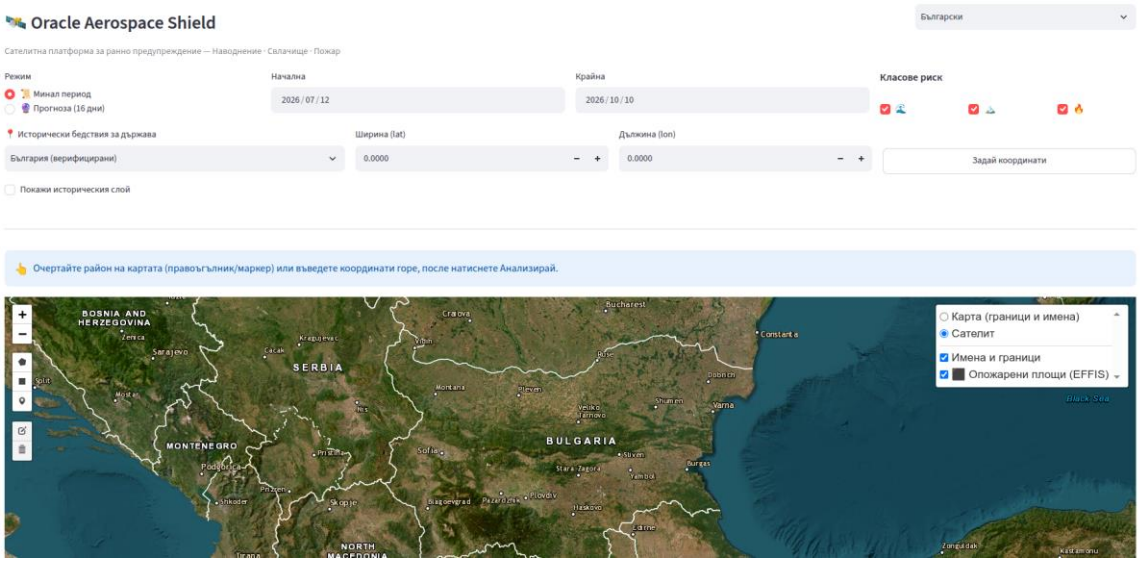
Двупроходен конвейер и уеб интерфейс

Обработката протича в два прохода (Фиг. 1). При първия за всяка локация се събират данните за избрания период и се прилага бърз скрининг: индекс на възприемчивост към свлачища (LSAT) и проверка на валежа спрямо праговата крива „интензитет-продължителност“. Локациите, които преминават скрининга, стават „критични зони“. При втория проход трите модела оценяват всяка зона независимо, така че една и съща точка може да е застрашена от няколко явления едновременно. Засегнатата площ се сегментира по NDVI, NDWI и SAR и при нужда се генерира сигнал.



Фиг. 1. Архитектура на Oracle Aerospace Shield: два прохода, три модела

Уеб интерфейсът е реализиран със Streamlit и Folium и работи в Docker контейнер (Фиг. 2). Подходът продължава разработената в ИКИТ-БАН уеб база от изображения MODIS, в която данните се извличат по период, облачна покривка и вид събитие (пожар, наводнение, замърсяване) [5]. Потребителят избира режим (минал период или прогноза до 16 дни), начална и крайна дата и класовете риск, след което отбелязва точка или правоъгълник на картата. Над основната карта се показват като отделни слоеве активните огнища на NASA FIRMS и опожарените площи на EFFIS за избрания период в цяла Европа, така че моделната оценка и реалните наблюдения могат да се сравнят визуално. Резултатът за всяка опасност се показва като карта с процент, степен и кратко обяснение на водещите фактори.



Фиг. 2. Уеб интерфейс на платформата: период, класове риск и слой с опожарени площи по EFFIS

Методология за оценка на риска

Общ подход

Всеки фактор x се нормализира линейно между физически обоснована долна граница a и горна граница b:

(2) $$f(x) = min(1, max(0, \frac{x-a}{b-a})),$$

а крайната оценка *R* е претеглена сума на нормализираните фактори. Изборът на прости, прозрачни модели е съзнателен: всяка оценка се придружава от списък на факторите, които я формират, и може да бъде проверена от експерт. Оценката се превръща в степен на опасност: нисък (под 0,35), среден (0,35–0,55), висок (0,55–0,75) и критичен (над 0,75). Границите и теглата на трите модела са обобщени в табл. 2.

Таблица 2. Фактори, граници на нормализиране и тегла на моделите

Модел	Фактор	Граници a–b	Тегло
Наводнение	максимален денонощен валеж P	10–80 mm	0,50
	повърхностна вода: max(NDWI, SAR)	−0,2 –0,6; −20…−5 dB	0,30
	релеф T (обратно на наклона)	0–15°	0,20
Свлачище	натрупан валеж за 14 дни C	30–150 mm	0,45
	наклон S	10–40°	0,35
	почвена влага M	0,1–0,5 m³/m³	0,20
Горски пожар	пиков FWI за периода	0–50	1,00
	корекция по NDVI	0,5–0,8	×1,00…0,35

Наводнения

Моделът комбинира максималния денонощен валеж *P*, наличието на повърхностна вода и релефа. Водата се оценява по два независими сензора, NDWI от Sentinel-2 и обратното разсейване от Sentinel-1, като се взима по-високата нормализирана стойност. Така радарът компенсира облачността, която често съпътства валежа. Релефният фактор *T* е обратно пропорционален на наклона, защото водата се събира в низините:

(3) $$R_{fl} = 0{,}5 \cdot P + 0{,}3 \cdot max(NDWI, SAR) + 0{,}2 \cdot T\ .$$

При екстремен валеж над 50 mm/24 h факторът на валежа се увеличава 1,3 пъти, за да се отрази опасността от внезапни (поройни) наводнения.

Свлачища

Скринингът използва прагова крива „интензитет–продължителност“ [19], където *I* е средната интензивност на валежа в mm/h, а *D* е продължителността на събитието в часове:

(4) $$I = \alpha \cdot D^{-\beta}\ .$$

Параметрите се избират според климатичната зона на точката (ориентировъчни стойности, приети в платформата: α = 2,28 и β = 0,44 за средиземноморски климат, α = 3,80 и β = 0,40 за умерен климат). Отчитат се само валежни събития с продължителност поне 6 часа. Индексът LSAT съчетава наклон (тегло 0,55), натрупан валеж за 14 дни (0,35) и бонус 0,10 при надвишена крива. Окончателният модел за свлачища е:

(5) $$R_{ls} = 0{,}45 \cdot C + 0{,}35 \cdot S + 0{,}20 \cdot M,$$

където C е натрупаният валеж, S е наклонът, а M е почвената влага (табл. 2). При наклон под 8° оценката се ограничава силно, тъй като равнинните терени на практика не се свличат.

Горски пожари

Основата е канадската система Fire Weather Index (FWI) [20], която използва и EFFIS. Системата се състои от три кода за влажност на горивото и три индекса за поведение на пожара. Кодът FFMC описва влажността на финото гориво на повърхността и реагира в рамките на дни, DMC – на средно дълбокия органичен слой (седмици), а DC – на дълбоките слоеве и едрите горива (месеци). От FFMC и вятъра се изчислява индексът на първоначално разпространение ISI, от DMC и DC – индексът на наличното гориво BUI, а от ISI и BUI – самият FWI.

Трите кода са рекурсивни: стойността за деня зависи от тази за предходния ден. Ако се изчисляват само за избрания период, те започват от началните стойности и подценяват натрупаното засушаване. Затова веригата се изчислява ден по ден от 60 дни преди началото на периода със стандартните начални стойности (FFMC = 85, DMC = 6, DC = 15). Входните

данни са максималната дневна температура, минималната относителна влажност, вятърът и валежът. За оценка се взима пиковата стойност на FWI в периода, нормализирана между 0 и 50, а като допълнителна информация се отчитат датата на пика и броят дни с FWI ≥ 21,3. Растителността коригира резултата: при NDVI над 0,5 (гъста, зелена растителност) оценката се намалява линейно до множител 0,35 при NDVI = 0,8:

(6) $R_{fire} = f(FWI) \cdot k, k = 1 - 0{,}65 \cdot f(NDVI)$,

където f е нормализирането по формула (2) с граници 0–50 за FWI и 0,5–0,8 за NDVI.

Климатично калибриране

Една и съща стойност на валежа има различно значение в Алпите и в Тесалия. Затова всяка точка се отнася към една от осем опростени климатични групи, изведени от класификацията на Кьопен-Гайгер [21]. В текущата версия климатичната зона определя параметрите на праговата крива (4). За всяка от осемте групи са разработени и пълни калибрационни таблици с граници за трите модела; примери за климатичните зони в България са дадени в Табл. 3. Включването им в изчислението на трите оценки е следващата стъпка в развитието на платформата.

Таблица 3. Примерни калибрационни граници за климатичните зони в България

Зона (пример)	**Денонощен валеж за наводнение, mm**	**Натрупан валеж за свлачище, mm**	**Наклон за свлачище, °**
Cfb – умерен (София, Стара Загора)	25–70	60–320	5–30
Dfb – континентален (Северна България)	20–65	50–250	8–35
Cfa – влажен субтропичен (Тракия)	22–65	50–260	5–28
Csa/Csb – средиземноморски (Южни Родопи)	18–55	30–200	5–30
ET/Dfd – планински (Рила, Пирин)	30–90	80–380	10–45

Резултати и валидация

За демонстрация е избрана точка край Лариса (Тесалия, Гърция) и периодът 12.07–10.10.2026 г. Платформата оцени опасността от пожар като критична: пиковата стойност на FWI е 73,2 (на 7.09.2026 г.), а в 69 от 91-те дни FWI е над 21,3. Това означава, че почти през целия период условията са благоприятствали бързото разпространение на пожар. Опасността от наводнение е ниска (0,34), а от свлачище липсва (0,00), което съответства на сухото лято и на равнинния релеф.

Резултатът за пожарите е сравнен с опожарените площи, картирани от EFFIS, и с активните огнища на NASA FIRMS (табл. 4). През периода EFFIS регистрира седем пожара в област Лариса, всичките под 35 ha.

Таблица 4. Опожарени площи по EFFIS най-близо до избраната точка

Населено място	**Дата**	**Площ, ha**	**Разстояние, km**
Анатоли	14.09.2026	5	≈ 22
Ахилио (Фарсала)	01.08.2026	32	≈ 36
Лутро Ларисис*	08.07.2026	68	≈ 25

** преди началото на периода, посочено за сравнение.*

Най-големите пожари в Гърция през 2026 г. са в Атика, на Крит, в област Солун и на островите, а не в низината на Тесалия. Това не опровергава моделната оценка, а показва разликата между опасност и възникване. FWI описва колко лесно би се запалил и разпространил пожар при дадено време. Дали той ще възникне, зависи от източник на запалване (човешка дейност, мълния), а дали ще стане голям, зависи от количеството и непрекъснатостта на горивото и от възможностите за гасене. В земеделската Тесалийска низина пожарите са чести, но малки, което съответства на наблюденията. Затова в интерфейса моделната опасност и реалните наблюдения се показват заедно, без едното да се представя като доказателство за другото.

Примерът очертава и ограниченията на подхода. Първо, метеорологичните данни са с пространствена разделителна способност около 10–30 km и не отразяват местни конвективни валежи. Второ, теглата в моделите са експертно зададени и се нуждаят от системна калибрация. Трето, оценката е за точка, а не за площ, така че коректното сравнение с наблюденията изисква радиус на сравнение (в платформата 10 km за FIRMS и 25 km за EFFIS). Четвърто, оптичните индекси зависят от наличието на безоблачно изображение, а облачната

покривка над България съществено ограничава наблюдението на явленията с оптични сензори [6], а при разширяване на търсенето до 90 дни те могат да не отразяват текущото състояние. Системната валидация по много локации и сезони е предмет на последваща работа.

Перспективи: БЛА и изкуствен интелект

Интеграция с безпилотни летателни апарати

Спътниците дават регионална картина с разделителна способност 10–30 m и повторно наблюдение на няколко дни, докато БЛА могат да осигурят сантиметрова разделителна способност в рамките на часове и под облаците. Мултикоптерите вече се прилагат и за геофизични изследвания с измерване на електрическите и магнитните свойства на терена [22], като носят магнитни, електромагнитни, инфрачервени, радарни и гама-сензори [23], а продължителността на полета им зависи до голяма степен от бордовите електрозахранващи системи [24]. Двата източника се допълват: естествената роля на платформата е да насочва полетите, а БЛА да проверяват и уточняват спътниковата оценка там, където тя е най-неопределена.

Предлаганата схема на интеграция има три стъпки. Първо, критичните зони от първия проход се превръщат в задачи за разузнаване с координати, площ и вид на опасността. Второ, според вида на опасността се избира полезният товар: термална камера за ранно откриване на огнища и контрол на тлеене след пожар; фотограметрични или LiDAR модели на склонове за наблюдение на деформации преди свлачище; мултиспектрална камера за прецизно картиране на залети и опожарени площи. Трето, резултатите от полета се връщат в платформата като нов георефериран слой, който служи и за калибриране на спътниковите индекси. Основните предизвикателства са нормативните ограничения за полети извън пряка видимост, времето за реакция на екипите и георефернирането на данните в обща система със спътниковите продукти.

Рояци от БЛА

Ограниченията на единичния апарат по продължителност на полета и обхват се преодоляват с рой: група от прости апарати, които се самоорганизират децентрализирано и решават колективно задачи, непосилни за всеки от тях поотделно [25]. За платформата това носи три предимства. Първо, мащаб и честота: екип от малки апарати за ниска височина може да следи периметъра на голям пожар и да подава на екипите на терена актуални данни с минимално закъснение [26]. Второ, устойчивост: отпадането на един апарат не прекъсва мисията, а апарати се добавят или изтеглят за презареждане, без да се спира наблюдението [26]. Трето, разделение на задачите: апаратът, открил огнище, насочва останалите за потвърждение, а съчетаните наблюдения от няколко апарата намаляват грешката при определяне на местоположението на пожара [27]. Тъй като патрулните мисии се планират с приоритет за зоните с по-висок пожарен риск [27], картата на платформата е естественият планиращ слой за такъв рой.

Методи на изкуствения интелект

Натрупаните от EFFIS, NASA FIRMS, NASA GLC и Copernicus EMS исторически събития дават възможност експертните тегла да бъдат заменени с обучени. Предвидени са четири насоки. Първо, класификатори с градиентно усилване (напр. XGBoost [28]) върху същите физически признаци, които запазват обяснимостта чрез оценка на приноса на всеки признак (напр. SHAP [29]). Второ, конволюционни невронни мрежи за сегментиране на залети и опожарени площи върху изображенията от Sentinel и БЛА. Трето, откриване на аномалии във времевите редове на NDVI и радарното разсейване като ранен сигнал за изсъхване или движение на склон. Четвърто, прогнози за 7–14 дни чрез числени метеорологични прогнози вместо реанализ, които надграждат съществуващия режим „прогноза до 16 дни“ и превръщат платформата в инструмент за ранно предупреждение.

При всички насоки физическите модели от раздел 3 остават еталон и резервен вариант при липса на данни за обучение. Обучените модели се сравняват с тях по едни и същи исторически събития и се въвеждат само там, където показват по-добри резултати, без да се губи обяснението на оценката.

Заключение

Oracle Aerospace Shield показва, че откритите данни на Copernicus и ERA5, обработени в облака с прозрачни физически модели, позволяват бърза оценка на три вида опасност за произволна точка в Европа. Верижното изчисляване на FWI е съществено за коректна оценка на пожарната опасност, а сравнението с EFFIS и NASA FIRMS директно в интерфейса помага на потребителя да различава опасност от реално събитие. Следващите стъпки са включване на климатичните калибрационни таблици в трите модела, системна валидация по исторически събития, интеграция на данни от БЛА и обучаващи модели, които да допълнят физическите, без да жертват обяснимостта. Платформата е приложима за нуждите на общини, служби за гражданска защита и застрахователи в България и региона.

Литература:

1. Мардиросян, Г. Аерокосмически технологии в борбата срещу природните бедствия. АИ „Проф. Марин Дринов“, София, 2026, с. 221, ISBN 978-619-245-574-3.
2. Mardirossian, G., B. Ranguelov, P. Getsov, S. Zabunov. Two innovations for critical infrastructure protection from natural disasters. Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, 2023, 76(10), pp. 1554–1561.
3. San-Miguel-Ayanz, J. et al. Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: the European Forest Fire Information System (EFFIS). In: Tiefenbacher, J. (ed.), Approaches to Managing Disaster – Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts. InTech, 2012, pp. 87–108.
4. Димитрова, М., Р. Недков. Регистриране на наводнения и пожари по данни от MODIS. Екологично инженерство и опазване на околната среда, 2014, бр. 3(4), с. 19–24.
5. Димитрова, М., Б. Велчева. Организация на специализирана web-база данни със спътникови изображения за екомониторинг на България. Proceedings of the Tenth Anniversary Scientific Conference with International Participation „Space, Ecology, Safety“ SES 2014, Sofia, 2014, pp. 435–439.
6. Димитрова, М. Изграждане на база от спътникови данни и приложението ѝ за екологични изследвания на територията на България. Дисертация за присъждане на образователна и научна степен „доктор“, ИКИТ-БАН, София, 2016.
7. Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017, 202, pp. 18–27.
8. Zippenfenig, P. Open-Meteo.com Weather API. Zenodo, 2023, doi:10.5281/zenodo.7970649.
9. Hersbach, H. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730), pp. 1999–2049.
10. Drusch, M. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 2012, 120, pp. 25–36.
11. Torres, R. et al. GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment, 2012, 120, pp. 9–24.
12. Farr, T. G. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 2007, 45, RG2004.
13. Giglio, L., W. Schroeder, C. O. Justice. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sensing of Environment, 2016, 178, pp. 31–41.
14. Dimitrova, M. Seasonal and temporal behavior of background NO2 pollution over Bulgaria on the base of Sentinel P5 data. Proceedings of the Nineteenth International Scientific Conference „Space, Ecology, Safety“ SES 2023, Sofia, 2023, pp. 179–181.
15. Fick, S. E., R. J. Hijmans. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 2017, 37(12), pp. 4302–4315.
16. Kirschbaum, D. B., R. Adler, Y. Hong, S. Hill, A. Lerner-Lam. A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. Natural Hazards, 2010, 52(3), pp. 561–575.
17. Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, Washington, 1974, pp. 309–317.
18. McFeeters, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7), pp. 1425–1432.
19. Peruccacci, S., M. T. Brunetti, S. Luciani, C. Vennari, F. Guzzetti. Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. Geomorphology, 2012, 139–140, pp. 79–90.
20. Van Wagner, C. E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 35, Canadian Forestry Service, Ottawa, 1987.
21. Beck, H. E., N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, E. F. Wood. Present and future Köppen–Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Scientific Data, 2018, 5, 180214.
22. Zabunov, S., G. Mardirossian. Multicopters for geophysical research. Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences, 2023, 76(7), pp. 1077–1083.
23. Граматиков, П., Дж. Тахов. Проучване на земните недра с безпилотни летателни апарати. Proceedings of the Twentieth Anniversary International Scientific Conference „Space, Ecology, Safety“ SES 2024, Sofia, 2024, pp. 122–127.
24. Граматиков, П., П. Гецов, Б. Бойчев, Г. Сотиров. Вторични електрозахранващи източници и системи на безпилотни летателни апарати. Университетска научна конференция, Национален военен университет „Васил Левски“, Велико Търново, 2014, с. 143–153.
25. Parpinelli, R., H. S. Lopes (eds.). Theory and New Applications of Swarm Intelligence. InTech, Rijeka, 2012, ISBN 978-953-51-0364-6.
26. Casbeer, D. W., D. B. Kingston, R. W. Beard, T. W. McLain. Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles. International Journal of Systems Science, 2006, 37(6), pp. 351–360.
27. Akhloufi, M. A., A. Couturier, N. A. Castro. Unmanned aerial vehicles for wildland fires: sensing, perception, cooperation and assistance. Drones, 2021, 5(1), 15.
28. Chen, T., C. Guestrin. XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, 2016, pp. 785–794.
29. Lundberg, S. M., S.-I. Lee. A unified approach to interpreting model predictions. Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017), Long Beach, 2017, pp. 4765–4774.

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING USING A SPATIAL CV RANDOM FOREST APPROACH: A CASE STUDY OF BLAGOEVGRAD PROVINCE, SOUTHWEST BULGARIA

Rosen Iliev, Boyko Ranguelov, Garo Mardirossian, Lachezar Filchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ilievrosen@space.bas.bg, branguelov@gmail.com, garo.mardirossian@gmail.com, lachezarhf@space.bas.bg

***Keywords**: Blagoevgrad Province; landslide susceptibility; Random Forest; machine learning; geomorphometry; digital elevation model; spatial cross-validation*

***Abstract:** This study presents a Landslide Susceptibility Model (LSM) for Blagoevgrad Province, Bulgaria, developed through an integrated geomorphometric and machine learning framework within a Python-based QGIS environment. The approach combines a landslide inventory of 108 mapped events with ten conditioning factors derived from remote sensing data and the EU-DEM v1.1 (25 m) dataset. A Random Forest classifier was used to estimate spatial landslide susceptibility probabilities. The model achieved a mean AUC of 0.908, PR-AUC of 0.796, and Brier score of 0.124, indicating strong discrimination and relatively good probabilistic prediction performance. Spatial cross-validation showed stable model performance across folds, while the low mean residual spatial autocorrelation (Moran's I = 0.037) indicates limited remaining spatial structure in the model residuals. The resulting susceptibility patterns show a clear spatial correspondence with the distribution of known landslides and the main geomorphological characteristics of the study area. The proposed LSM can support regional-scale landslide susceptibility assessment, environmental planning, and risk management in mountainous areas.*

КАРТОГРАФИРАНЕ НА ПОДАТЛИВОСТТА КЪМ СВЛАЧИЩА ЧРЕЗ ПОДХОД С ПРОСТРАНСТВЕНА КРЪСТОСАНА ВАЛИДАЦИЯ И СЛУЧАЙНА ГОРА (RANDOM FOREST): ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРИМЕРА НА ОБЛАСТ БЛАГОЕВГРАД, ЮГОЗАПАДНА БЪЛГАРИЯ

Росен Илиев, Бойко Рангелов, Гаро Мардиросян, Лъчезар Филчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ilievrosen@space.bas.bg, branguelov@gmail.com, garo.mardirossian@gmail.com, lachezarhf@space.bas.bg

***Ключови думи:** Област Благоевград; свлачищна податливост; случайна гора; машинно обучение; геоморфометрия; цифров модел на релефа; пространствена кръстосана валидация*

***Резюме:** Настоящото изследване представя модел за картографиране на податливостта към свлачища (Landslide Susceptibility Model, LSM) за област Благоевград, България, посредством интегриран подход, съчетаващ геоморфометричен анализ и машинно обучение в базирана на Python среда в QGIS. Методологичната рамка интегрира инвентар от 108 картографирани свлачищни явления, с десет условни фактора, извлечени от данни от дистанционни изследвания и цифровия модел на релефа EU-DEM v1.1 с пространствена резолюция 25 m. За моделиране на пространственото разпределение на вероятността за свлачищна податливост е приложен класификаторът Random Forest. Полученият модел достига средна стойност на площта под ROC кривата (AUC) от 0,908, площ под кривата Precision–Recall (PR-AUC) от 0,796 и Brier score от 0,124. Тези показатели свидетелстват за висока дискриминационна способност на модела и относително добра точност на вероятностните му оценки. Резултатите от пространствената кръстосана валидация показват относително стабилна производителност на модела между отделните пространствени подмножества. Допълнителният анализ на остатъчната пространствена автокорелация показва ниска средна стойност на Moran's I (0,037), което предполага ограничена остатъчна пространствена структура в прогнозните грешки на модела. Пространственото*

разпределение на моделираната податливост към свлачища показва ясно съответствие с локализацията на регистрираните свлачища, както и с основните геоморфоложки характеристики на изследваната територия. Разработеният модел за картографиране на свлачищната податливост предоставя приложима рамка за регионална оценка на пространственото разпределение на потенциално податливи към свлачища територии и може да подпомогне процесите на териториално планиране, както и управлението на свлачищния риск в планински райони. Предложеният подход предоставя методична рамка за пространствено характеризиране на податливостта към свлачища, в унисон с целите на проекта „Космически и наземни технологии за изследване на каскадни мултирискови събития – модели, приложения, прекурсори“ (SPARC), и създава основа за интегрирането на резултатите в анализа на каскадни мултирискови събития.

Introduction

Landslide Susceptibility Models (LSMs) quantify the spatial probability of landslide occurrence as a function of environmental conditions and are widely used in hazard assessment, land-use planning, and risk mitigation. Methodologically, LSMs establish relationships between landslide inventories and conditioning factors derived primarily from Digital Elevation Models (DEMs) and remote sensing, including slope, aspect, curvature, lithology, and land cover. Machine learning (ML) methods, particularly Random Forest (RF), are increasingly applied because of their ability to capture nonlinear interactions among conditioning variables and model complex susceptibility patterns (Gautam et al., 2021; Joshi et al., 2025; Sun et al., 2023; Wang et al., 2023; Zhou et al., 2025).

In Bulgaria, GIS- and DEM-based approaches have demonstrated their applicability to regional landslide and natural-hazard assessment. Ivanova (2023) investigated water-related natural hazards, including landslides, in the Rhodope Mountains, while Tcherkezova et al. (2023) developed landslide and rockfall susceptibility models for the Chepelarska River Basin using remote sensing datasets, including DEM and CORINE Land Cover. Recent regional assessments of Bulgaria (Berov et al., 2025; Ivanov et al., 2022) provide generalized susceptibility patterns; however, their spatial scale may not adequately represent local variability in terrain stability.

Against this background, the present study develops a Landslide Susceptibility Model for Blagoevgrad Province by integrating ten conditioning factors derived from DEM and remote sensing data with an inventory of 108 mapped landslides of different types. A Random Forest framework is employed to capture nonlinear relationships between terrain and environmental characteristics and observed landslide occurrence. The resulting LSM aims to provide higher spatial detail and a data-driven representation of susceptibility, supporting regional land-use planning and landslide risk mitigation in the heterogeneous mountainous environment of southwestern Bulgaria.

Study area

Blagoevgrad Province, southwestern Bulgaria, covers 6,449.5 km² and occupies a geomorphologically and environmentally diverse transitional zone between continental and Mediterranean climatic influences. The region encompasses the major mountain systems of Pirin, Rila, and the Western Rhodopes, together with deeply incised valleys of the Struma, Strumeshnitsa, and Mesta rivers. The pronounced relief energy, steep slopes, and complex drainage network provide favourable conditions for gravity-driven mass movements.

The geological setting is highly heterogeneous, ranging from resistant crystalline basement rocks to weathered sedimentary formations, resulting in substantial spatial variability in slope strength, weathering, and erosion susceptibility. Seasonal and high-intensity precipitation events represent important landslide-triggering processes. In addition, deforestation, road construction, and urban expansion locally modify surface drainage and vegetation cover, potentially increasing slope instability.

The combined effects of complex topography, heterogeneous lithology, climatic forcing, and anthropogenic disturbance make Blagoevgrad Province an appropriate setting for regional landslide susceptibility modelling. The pronounced intra-regional variability further requires a spatially explicit approach capable of resolving differences in terrain and environmental conditions.

Methods and data

Landslide Susceptibility Modeling Framework

The Landslide Susceptibility Model (LSM) for Blagoevgrad Province was developed using a fully automated Python-based geoprocessing workflow implemented in QGIS. The workflow constitutes an original software framework for automated landslide susceptibility mapping, with the complete source code openly available on GitHub and archived in Zenodo (Iliev, 2026). The workflow applies GDAL-based preprocessing to harmonize all input datasets in terms of spatial resolution,

coordinate reference system, and spatial extent, ensuring a consistent predictor dataset for machine learning analysis.

The model uses ten spatially distributed conditioning factors derived from the Copernicus EU-DEM (25 m), representing complementary characteristics of terrain morphology, hydrological processes, and surface complexity.

The EU-DEM served as the primary elevation source from which a series of geomorphometric derivatives was generated. The final predictor set consisted of:

✓ EU-DEM (EEA, 2019), representing absolute elevation and regional geomorphometric context. Elevation controls broad climatic, hydrological, and geomorphic gradients and provides a first-order descriptor of terrain energy.

✓ Flow Accumulation, describing the potential convergence of surface runoff and concentration of drainage pathways that may contribute to slope failure.

✓ Slope Gradient, representing local terrain inclination and controlling the gravitational forces acting on slope materials.

✓ Slope Fractal, representing local slope variation and abrupt changes in slope morphology. The variable was calculated using a variogram-based fractal approach following the methodology originally proposed by Mark and Aronson (1984).

✓ Lacunarity (Plotnick et al., 1993), expressing the spatial heterogeneity and fragmentation of terrain patterns.

✓ Elevation Anomaly, representing the relative elevation of each cell with respect to its surrounding neighborhood and highlighting local topographic prominence or depressions.

✓ Distance to Roads, derived from the OpenStreetMap (OSM) road network, representing the Euclidean distance from each raster cell to the nearest mapped road. This predictor represents the spatial association between landslide susceptibility and areas of potential anthropogenic terrain modification.

✓ Distance to Rivers, derived from the OpenStreetMap (OSM) hydrographic network, representing the Euclidean distance to the nearest mapped river or stream. Proximity to river channels represents the spatial association with fluvial erosion and local hydrological conditions that may contribute to slope instability.

✓ Aspect, describing the compass orientation of slopes. Aspect influences the spatial distribution of solar radiation, evapotranspiration, and soil moisture, thereby affecting weathering processes, vegetation cover, and slope stability.

✓ Land Cover (EEA, 2023), obtained from the Copernicus Land Monitoring Service at 10 m spatial resolution, representing the dominant land-cover class for each raster cell. Land cover influences slope stability through its effects on vegetation reinforcement, infiltration capacity, and human land-use activities, thereby providing information on both natural and anthropogenic controls of landslide susceptibility.

All raster layers were resampled to a common spatial resolution of 25 m and aligned to the same coordinate reference system and spatial grid prior to model development.

The predictor set comprised conventional terrain and environmental variables, supplemented by fractal and anomaly-based descriptors to capture local geomorphological variability. An iterative selection procedure based on Random Forest feature importance, Variance Inflation Factor (VIF), and spatial cross-validation reduced the initial variable set to ten non-redundant predictors.

The modelling dataset included 108 landslide observations and 216 spatially constrained pseudo-absence samples. Negative samples were excluded within 75 m of known landslides, corresponding to approximately three 25 m raster cells, yielding a 1:2 class ratio.

A Random Forest classifier with 250 trees, maximum depth of 10, and minimum leaf size of four was used. Class imbalance was addressed using "balanced_subsample", and isotonic calibration was applied through "CalibratedClassifierCV". Spatial validation used five-fold "StratifiedGroupKFold" with 250 m spatial blocks, ensuring that observations from the same block were not shared between training and validation sets while maintaining class balance.

Model performance was assessed using ROC-AUC, PR-AUC, Brier score, sensitivity, specificity, and Matthews Correlation Coefficient (MCC), with a 0.5 probability threshold for the latter three metrics. Residual spatial autocorrelation was evaluated using Moran's I with an eight-nearest-neighbour structure. Cross-validated AUC uncertainty was estimated from 200 spatial bootstrap resamples of pooled out-of-fold predictions, with up to 500 observations per resample. A final calibrated Random Forest was subsequently fitted to the complete dataset.

The resulting calibrated probabilities were used to generate the susceptibility map. Raw and smoothed probability surfaces were produced, with the latter used for visualization. Continuous susceptibility values were classified into five relative classes using the 20th, 40th, 60th, and 80th percentiles.

Data and GIS software

DEM and Land Cover Data

The primary elevation dataset was EU-DEM v1.1, provided by the Copernicus Land Monitoring Service at 25 m spatial resolution and developed by the European Environment Agency (EEA) from SRTM and ASTER GDEM data. It was used to derive all terrain-related predictors (EEA, 2019). Land-cover information was obtained from Copernicus Land Cover 2023 at 10 m resolution and incorporated as an environmental predictor representing vegetation, surface cover, and anthropogenic land use (European Environment Agency, 2023).

Inventory data

For the training of the landslide susceptibility model (LSM) in Blagoevgrad Province, an inventory of documented landslides was compiled from an online catalog provided by Geoprotection Pernik, available through the Ministry of Regional Development and Public Works of the Republic of Bulgaria (https://gz-pernik.mrrb.government.bg/landslide/). The dataset contains the geographic coordinates of 108 recorded landslide events and was used as the primary source of positive samples for model calibration and validation.

GIS software

All spatial preprocessing, raster processing, feature integration, model training, and prediction were performed in the open-source QGIS environment, integrated with Python libraries for spatial, statistical, and machine learning analysis.

Results and discussion

The statistical reliability and predictive performance of the LSM for Blagoevgrad Province are presented in Table 1 and Table 2 and Figure 1 and Figure 2, followed by the corresponding analysis and discussion.

Table 1. Performance and Validation Metrics of the Landslide Susceptibility Model

Metric	Mean	Standard Deviation	Minimum	Maximum
AUC	0.908	0.025	0.869	0.937
PR-AUC	0.796	0.086	0.670	0.918
Brier Score	0.124	0.016	0.108	0.149
Sensitivity	0.647	0.062	0.588	0.737
Specificity	0.894	0.024	0.848	0.913
Matthews Correlation Coefficient (MCC)	0.561	0.037	0.524	0.630
Moran's I	0.037	0.049	−0.040	0.090

Table 2. Multicollinearity (Variance Inflation Factor – VIF) and Predictor Importance Analysis of the Landslide Susceptibility Model

Predictor	Importance (%)	VIF
Distance to Roads	21.27	1.21
EU-DEM	12.90	1.20
Slope Fractal	12.18	1.10
Slope Gradient	10.91	1.07
Distance to Rivers	9.79	1.27
Elevation Anomaly	9.10	1.06
Lacunarity	6.46	1.59
Flow Accumulation	6.16	1.04
Aspect	5.89	1.02
Land Cover	5.35	1.13

The spatially cross-validated Random Forest showed strong and relatively stable predictive performance (Table 1). Mean ROC-AUC was 0.908 (SD = 0.025; range = 0.869–0.937), while PR-AUC was 0.796 (SD = 0.086; range = 0.670–0.918), indicating good discrimination with greater fold-to-fold variability in precision–recall performance. The mean Brier score of 0.124 (SD = 0.016; range = 0.108–0.149) indicates relatively low probabilistic prediction error, although it does not alone demonstrate full calibration. At a 0.5 threshold, mean sensitivity and specificity were 0.647 and 0.894,

respectively, while MCC was 0.561 (range = 0.524–0.630), indicating moderate classification agreement. Residual Moran's I was low (mean = 0.037; range = −0.040–0.090), suggesting limited remaining spatial structure in the residuals and reducing concern that model evaluation was dominated by strong residual spatial dependence.

Predictor importance (Table 2) was dominated by anthropogenic, topographic, morphometric, and hydrological variables. Distance to Roads was the most influential predictor (21.27%), followed by EU-DEM (12.90%), Slope Fractal (12.18%), Slope Gradient (10.91%), Distance to Rivers (9.79%), and Elevation Anomaly (9.10%). The four principal terrain variables (EU-DEM, Slope Fractal, Slope Gradient, and Elevation Anomaly) accounted for 45.09% of total importance. Distance to Rivers and Flow Accumulation contributed 9.79% and 6.16%, respectively, while Lacunarity, Aspect, and Land Cover contributed 6.46%, 5.89%, and 5.35%.

The high importance of Distance to Roads may reflect the influence of road-related modifications to slope geometry and drainage, although it may also partly reflect accessibility and the spatial distribution of officially documented landslides. The contribution of terrain and hydrological variables indicates that topographic morphology and drainage conditions provide substantial information for distinguishing susceptibility levels.

Multicollinearity was low across all predictors, with VIF values of 1.02–1.59 and a maximum of 1.59 for Lacunarity (Table 2), indicating no substantial variance inflation.

The model demonstrated strong discrimination and comparatively stable performance under spatial cross-validation. The lower sensitivity (0.647) should be interpreted in relation to the available inventory and the 1:2 positive-to-negative sampling ratio, as the limited number and spatial distribution of positive observations may affect sensitivity estimation across validation folds.

The susceptibility maps (Fig. 1 and Fig. 2) show a spatially coherent pattern, with the highest predicted susceptibility concentrated along the Struma, Mesta, and Strumeshnitsa valleys and their transitions with mountainous terrain, including the Blagoevgrad–Simitli, Sandanski–Petrich, and Gotse Delchev kettles. Pronounced hotspots occur in the Kresna Gorge, the Pirin and Slavyanka Mountains, northern Belasitsa, the Ograzhden massif, and the southwestern margins of the Western Rhodopes. Lower susceptibility generally characterizes the interior parts of the major mountain massifs.

The spatial pattern is consistent with the dominant contribution of terrain-related predictors and the hydrological variables Distance to Rivers and Flow Accumulation, while the concentration of susceptibility along transport corridors corresponds to the high importance of Distance to Roads. Overall, the LSM provides a spatially coherent representation of susceptibility across the province, with elevated values concentrated mainly in valley–mountain transition zones and areas of complex terrain.

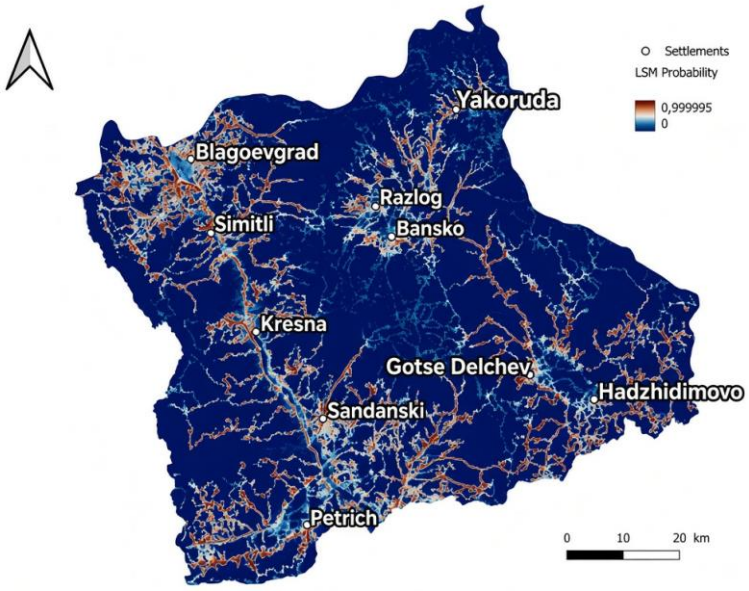


Fig. 1. Landslide Susceptibility Map of Blagoevgrad Province

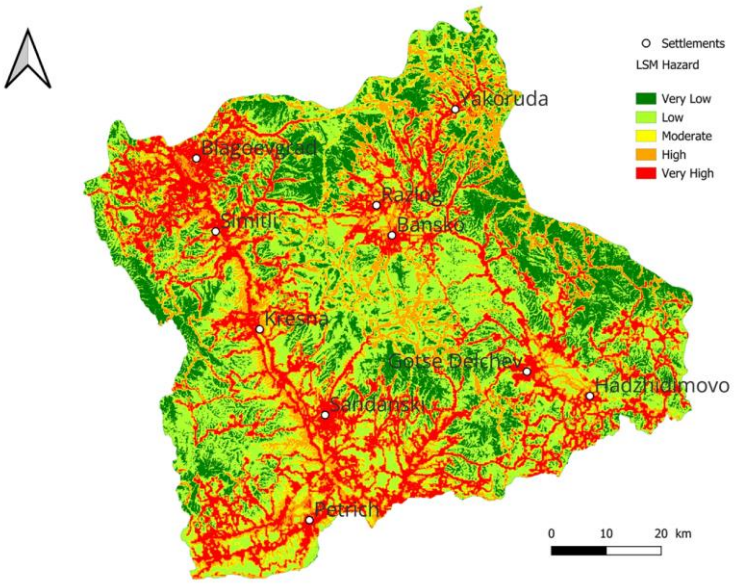


Fig. 2. Reclassified Landslide Susceptibility Map of Blagoevgrad Province Using Quantile Classification

Conclusion

This study developed a spatially explicit Landslide Susceptibility Model for Blagoevgrad Province using DEM-derived and environmental predictors within a Python-based QGIS framework. The calibrated Random Forest model, evaluated through spatial cross-validation, demonstrated strong and relatively stable predictive performance. Susceptibility was spatially differentiated, with higher probabilities concentrated mainly in valley–mountain transition zones and areas influenced by complex terrain and proximity to roads and rivers. The open-source, reproducible workflow integrates landslide inventory data, automated geospatial processing, spatial validation, and probability calibration, providing a transferable framework for regional landslide susceptibility assessment and supporting land-use planning, environmental assessment, and risk management in mountainous regions.

Funding and Acknowledgements

This study was nationally co-funded by the project “Space and Ground Technologies for Studying Cascading Multi-hazard Events - models, Applications, Precursors (SPARC)”, supported under Co-funding Contract No. KP-06-COST / 23 / dated 18 August 2026, concluded between the Space Research and Technology Institute at the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI–BAS) and the Bulgarian National Science Fund (BNSF) within the framework of BNSF-1.009 – “Procedure for Providing National Co-funding for the Participation of Bulgarian Research Teams in Established Actions in Science and Technology.”

References:

1. Berov, B., Gadzhev, G., Ivanov, P., Dobrev, N., Ivanov, V., Nikolova, N., Toteva, A., Krastanov, M., Nankin, R., Frantzova, A. “Assessment of Landslide Susceptibility in Bulgaria, in the Context of Climate Change, Using the Mora and Vahrson Method.” Geologica Balcanica, 54(1), 2025, pp. 3–16. DOI: 10.52321/GeolBalc.54.1.3.
2. European Environment Agency. “EU-DEM v1.1 – Pan-European Digital Elevation Model (25 m).” Copernicus Land Monitoring Service, 2019. https://www.copernicus.eu/en.
3. European Environment Agency. “Copernicus Land Cover 2023 – High Resolution Land Cover (10 m).” Copernicus Land Monitoring Service, 2023. https://land.copernicus.eu/.
4. Gautam, P., Kubota, T., Sapkota, L. M., et al. “Landslide Susceptibility Mapping with GIS in High Mountain Area of Nepal: A Comparison of Four Methods.” Environmental Earth Sciences, 80, 2021, 359. DOI: 10.1007/s12665-021-09650-2.
5. Iliev, R. “Spatial Cross-Validated Random Forest for Landslide Susceptibility Mapping (Version V1.0.0).” Computer software, Zenodo, 2026. DOI: 10.5281/zenodo.22685563.
6. Ivanov, P., Dobrev, N., Berov, B., Frantzova, A., Krastanov, M., Nankin, R. “Landslide Risk for the Territory of Bulgaria by Administrative Districts.” Geologica Balcanica, 51(3), 2022, pp. 21–28. DOI: 10.52321/GeolBalc.51.3.21.

7. Ivanova, E. “Water-Related Natural Hazard Assessment: A GIS-Based Methodology for the Rhodope Mountain Range in Bulgaria.” In Proceedings of the Nineteenth International Scientific Conference Space, Ecology, Safety (SES23), Sofia, Bulgaria, 2023, pp. 291–296.
8. Joshi, B. R., Bhandary, N. P., Acharya, I. P., KC, N., Bhandari, C. “Landslide Susceptibility Mapping Optimization for Improved Risk Assessment Using Multicollinearity Analysis and Machine Learning Technique.” Applied Sciences, 15(22), 2025, 12152. DOI: 10.3390/app152212152.
9. Mark, D. M., Aronson, P. B. “Scale-Dependent Fractal Dimensions of Topographic Surfaces: An Empirical Investigation, with Applications in Geomorphology and Computer Mapping.” Mathematical Geology, 16(8), 1984, pp. 671–683. DOI: 10.1007/BF01033029.
10. Ministry of Regional Development and Public Works. “Landslide Register.” Geoprotection Pernik, n.d. https://gz-pernik.mrrb.government.bg/landslide/.
11. Plotnick, R. E., Gardner, R. H., O’Neill, R. V. “Lacunarity Indices as Measures of Landscape Texture.” Landscape Ecology, 8(3), 1993, pp. 201–211. DOI: 10.1007/BF00125351.
12. Sun, D., Gu, Q., Wen, H., Xu, J., Zhang, Y., Shi, S., Xue, M., Zhou, X. “Assessment of Landslide Susceptibility along Mountain Highways Based on Different Machine Learning Algorithms and Mapping Units by Hybrid Factors Screening and Sample Optimization.” Gondwana Research, 123, 2023, pp. 89–106. DOI: 10.1016/j.gr.2022.07.013.
13. Tcherkezova, E., Zareva, E., Yordanov, N. “GIS-Based Landslide and Rockfall Susceptibility Zoning in Chepelarska River Basin (Western Rhodope Mountains, Bulgaria).” Engineering Geology and Hydrogeology, 37, 2023, pp. 117–132. DOI: 10.52321/igh.37.1.117.
14. Wang, X., Du, A., Hu, F., Liu, Z., Zhang, X., Wang, L., Guo, H. “Landslide Susceptibility Evaluation Based on Active Deformation and Graph Convolutional Network Algorithm.” Frontiers in Earth Science, 11, 2023, 1132722. DOI: 10.3389/feart.2023.1132722.
15. Zhou, C., Gan, L., Cao, Y., Wang, Y., Segoni, S., Shi, X., Motagh, M., Singh, R. P. “Landslide Susceptibility Assessment of the Wanzhou District: Merging Landslide Susceptibility Modelling (LSM) with InSAR-Derived Ground Deformation Map.” International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 136, 2025, 104365. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104365.

ПРОСТРАНСТВЕНО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПРАХОВОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ В ГРАД ПЛОВДИВ

Мария Димитрова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: maria@space.bas.bg

Ключови думи: *фини прахови частици (ФПЧ), атмосферно замърсяване*

Резюме: *Използвани са данните от 23 любителски автоматични измервателни станции за ФПЧ в гр. Пловдив за периода от декември 2019 г. до края на септември 2026 г. Направен е анализ на териториалното разпространение на различните по големина прахови частици на територията на града.*

SPATIAL DISTRIBUTION OF DUST POLLUTION OVER THE CITY OF PLOVDIV

Maria Dimitrova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: maria@space.bas.bg

Keywords: *fine particulate matter (FPM), atmospheric pollution*

Abstract: *Data from 23 amateur automatic fine particulate matter (FPM) monitoring stations in the city of Plovdiv were used, covering the period from December 2019 to October 2026. An analysis was conducted regarding the spatial distribution of dust particles of various sizes across the city.*

Въведение

Пловдив е град с население от над 370 хиляди жители. Отстои на 10 km от Родопа планина и на 50 km от Стара планина. Градът е застроен върху седем сиенитови хълма, някои с височина над 250 m. Поради това Пловдив често е наричан „Градът на седемте тепета“.

Пловдив в разположен в централната част на Горнотракийската низина. През него преминава най-пълноводната река в Южна България – Марица. По този начин градът естествено се разделя на две части. На север от Марица е разположен единствено район „Северен“, известен още със старото си наименование Кършияка, а на юг се намира същинската част на града, включваща останалите пет района.

Пловдивското поле е представлява алувиална низина, формирана от река Марица и нейните притоци. От северозапад се издигат възвишенията на Същинска и Сърнена Средна гора, на изток са Чирпанските възвишения. От юг, полето е оградено от склона на Родопа планина, който е стръмен и висок – около 1300 m н.в., прорязан от тесните долини на реките Въча, Стара река, Яденица, Чепинска и др. В града са разположени шест сиенитни хълма, наричани още тепета.

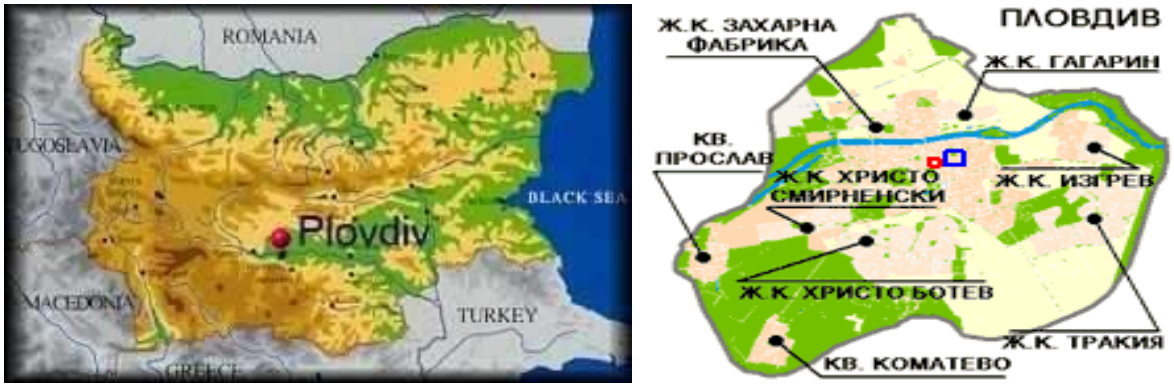
Средната годишна температура е 12,4°C. Средната максимална температура през юли е 30,3°C, а абсолютният максимум през същия месец е измерен през 2000 г. +45,0°C. Средната годишна минимална температура е 6,5°C, а абсолютният минимум е минус 31,5°C в състояние на температурна инверсия. Средната годишна относителна влажност на въздуха е 73%, като най-висока е през декември – 86%, а най-ниска през месеците юли и август – 62%.

Средната годишна сума на валежите е 540 mm, с максимум през май – 69,2 mm и минимум през август – 31 mm. Средният годишен брой дни със снежна покривка в Пловдив е 23 дни. Средната височина на снежната покривка е между 2 и 4 cm, а максималната между 6 и 13 cm. В „градът под тепетата“ преобладават слаби ветрове (0–5 m/s), като ветровете със

скорост до 1 m/s са до 95% в годината. Мъглите са чести през по-хладните месеци, като дните с мъгли за една година са средно 33 [1].

Община Пловдив включва единствено град Пловдив и е разделена на 6 района: Централен, Източен, Западен, Северен, Южен и Тракия. Градът е основна връзка във веригата на транспортните маршрути, свързващи Европа и Мала Азия, и пресечна точка на три паневропейски коридора (IV, VIII и X). [2].

Местоположението на града и неговото административно разделение е показано на фиг. 1 [3].



Фиг. 1. Териториално разположение и административно деление на Пловдив

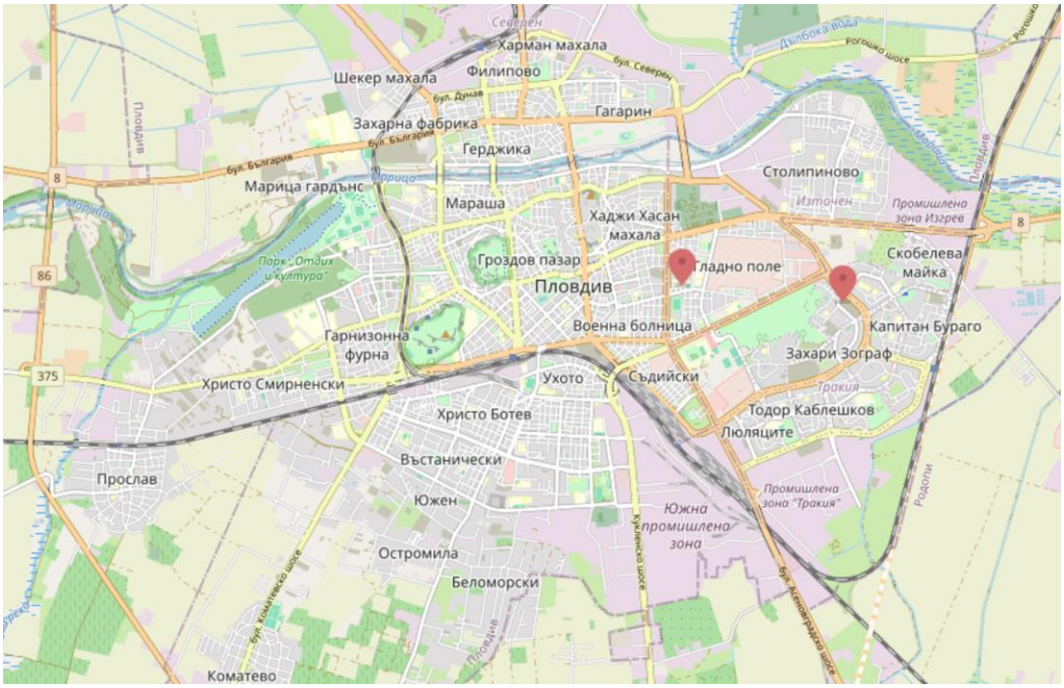
На фиг. 2 е представено сателитно изображение на града от последната година по данни от Google Earth [4].



Фиг. 2. Сателитно изображение на гр. Пловдив

Използвани данни и обработка на данните

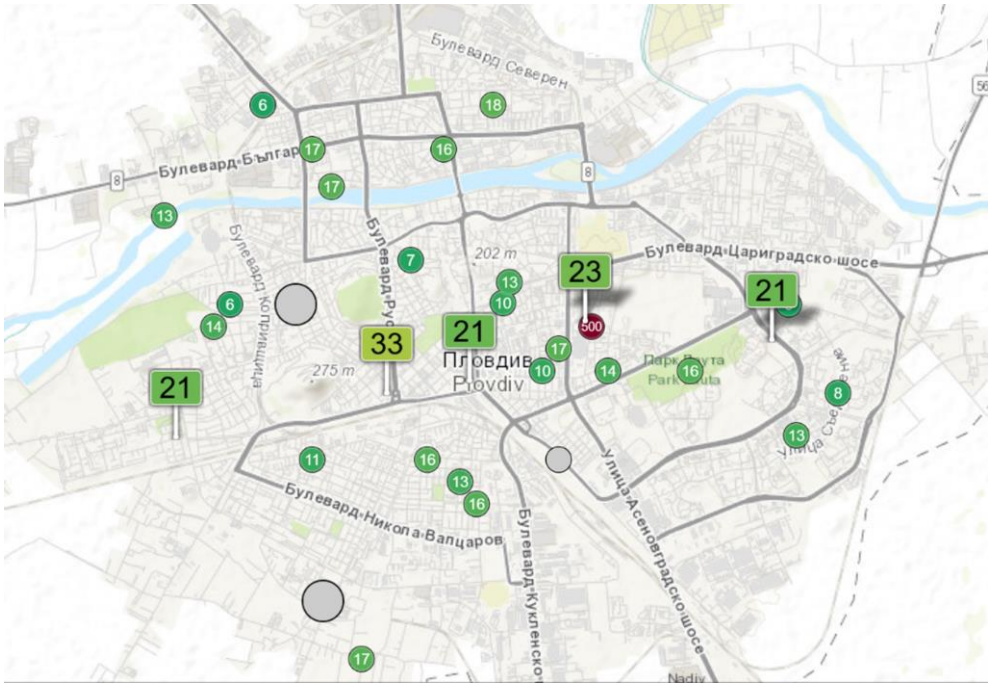
На територията на град Пловдив са разположени само 2 Автоматични измервателни станции (АИС) за отчитане на качеството на въздуха [5]. Тяхното разположение е представено на фиг. 3.



Фиг. 3. Местоположение на АИС в Пловдив

Както се вижда от фигурата, и двете станции са в източната част на града. Освен това, въпреки че станция Тракия (разположената по на изток на фиг. 3) измерва фини прахови частици (ФПЧ) PM2.5, данни в реално време от тези измервания не се предоставят. Така от официалните източници имаме данни само за PM10.

На територията на града са разположени между 25 и 30 броя любителски автоматични измервателни станции [6], даващи данни за ФПЧ (PM 2.5 и 10) от декември 2019 г., чието местоположение е показано на фиг. 4



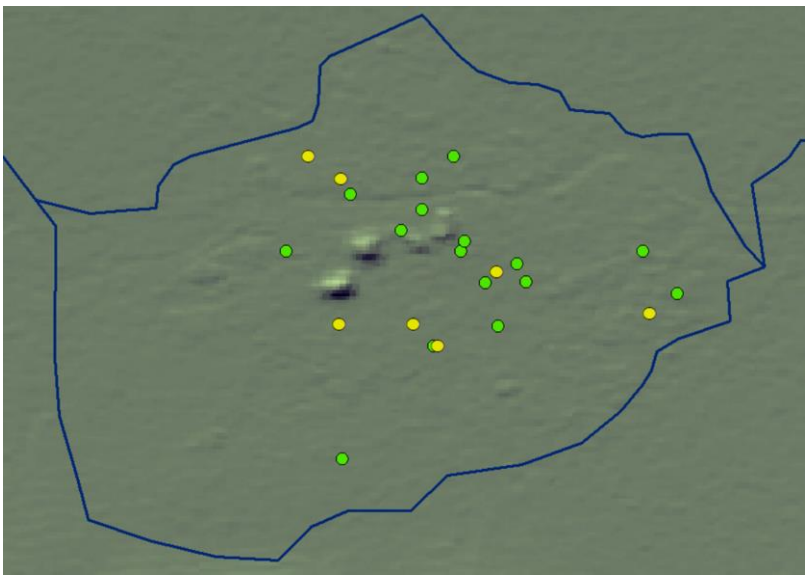
Фиг. 4. Разположение на любителските автоматични измервателни станции

Получаваните от тези станции данни са в *.csv* формат и съдържат данни на дневна база за минималната и максималната измерена през деня стойност, тяхната медиана и стандартно отклонение.

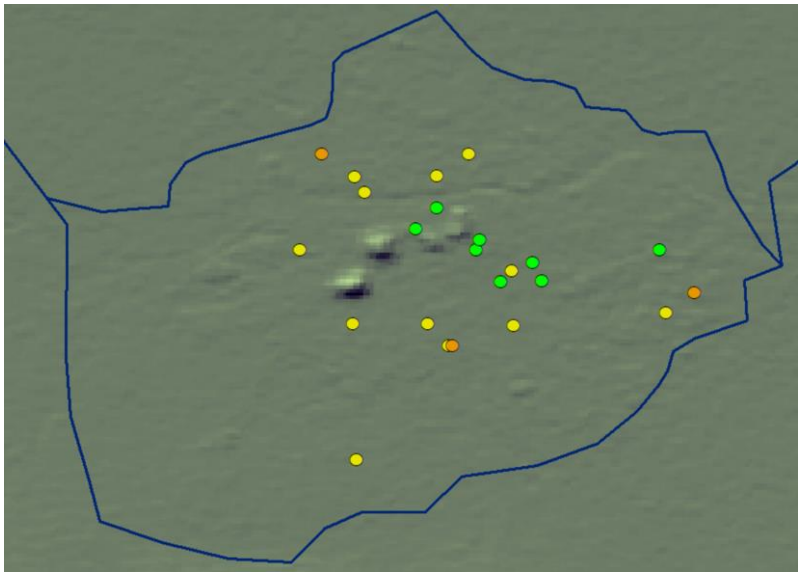
За целта на изследването са използвани данни от 23 станции, които са сравнително пълни. За две от тези станции данни има само за 1 година, за 1 от 3, но повечето са работили през целия период декември 2019 – октомври 2026. За всяка станция са определени географските координати, както и средната стойност на медианата за целия период и са въведени в ГИС среда. Получените стойности за PM2.5 са разделени в два класа – под и над 10 μg/m^3, а за PM10 – в три класа между 10 и 15, от 15 до 20 и над 20 μg/m^3.

Получени резултати и анализ

На фиг. 5 и фиг. 6 са представени резултатите по класове за PM 2.5 и PM10 съответно, като с увеличаване на стойността, цветът се променя от зелено към оранжево.

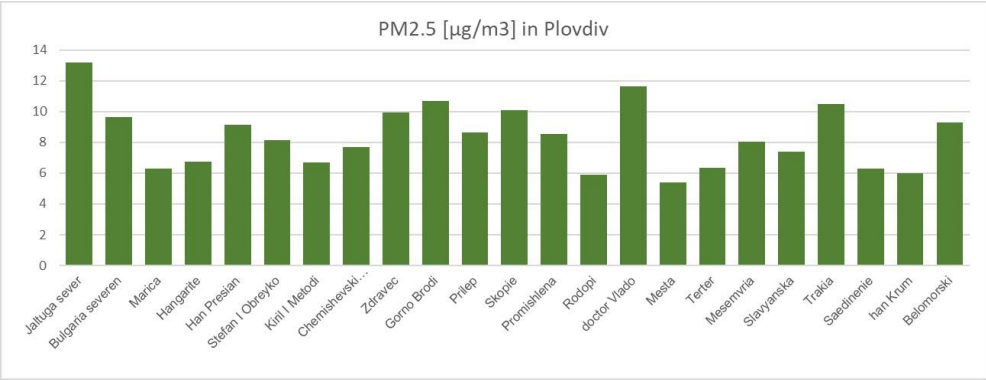


Фиг. 5. Средни стойности по класове за PM2.5 в ГИС среда

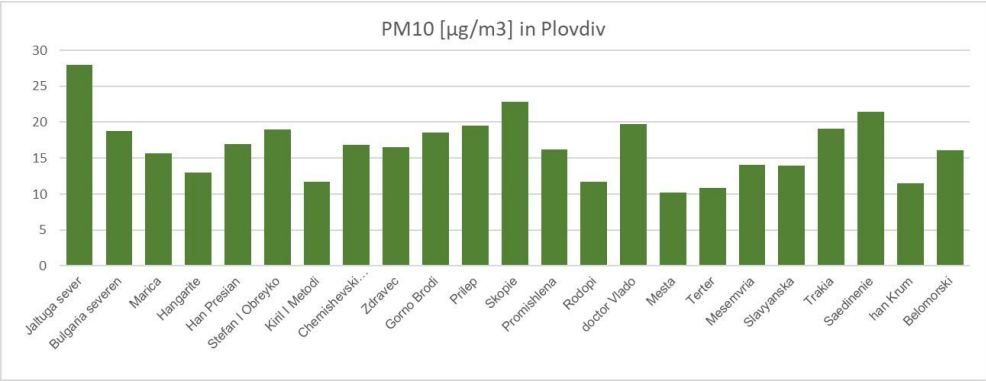


Фиг. 6. Средни стойности по класове за PM10 в ГИС среда

На фиг. 7 и фиг. 8 са представени измерените усреднени стойности на медианата съответно за PM 2.5 и PM 10 за всяка една от използваните станции.



Фиг. 7. Средни стойности по станции за PM2.5



Фиг. 8. Средни стойности по станции за PM10

Както се вижда от представените резултати, измерените средни медианни стойности са доста високи спрямо пределно допустимите норми (ПДН), които на годишна база за PM2.5 и PM10 са съответно 25 и 40 µg/m^3.

От фиг. 5 ясно се вижда, че южните райони на града са по-запрашени от северните с дребни ФПЧ.

На фиг. 6 се вижда, че по-едрите прахови частици са повече в южните и северните райони.

Центърът на града е сравнително по-чист.

Заключение

В заключение можем да отбележим, че данните от любителски АИС са единственият наземен източник, който ни позволява да определим някакъв пространствен модел на замърсяването с ФПЧ.

Измервания посредством дистанционни методи са трудно приложими в градски мащаби, особено що се отнася до типа и количеството на ФПЧ.

Литература:

1. За Пловдив – https://www.milchevi.com/%D0%B7%D0%B0-%D0%BD%D0%B0%D1%81/%D0%B7%D0%B0-%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B4%D0%B8%D0%B2/
2. Град Пловдив – https://www.visitplovdiv.com/bg/node/152
3. Географско положение на Пловдив – http://plovdiv.atspace.com/geografia.htm
4. Google Earth – https://earth.google.com/
5. Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух – https://www.eea.government.bg/kav/
6. Real-time air quality index – https://aqicn.org/station/@58867/

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

ВРЪЗКА МЕЖДУ ТЕРИТОРИАЛНОТО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ПРАХОВОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ И ЗЕЛЕНИТЕ ПЛОЩИ В ГРАД СОФИЯ

Мария Димитрова, Елица Узунова, Иван Стоев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: maria@space.bas.bg, elizauzunova@gmail.com, ivanstoev@space.bas.bg

Ключови думи: *фини прахови частици (ФПЧ), атмосферно замърсяване, градска растителност*

Резюме: *Използвани са данните от около 350 любителски автоматични измервателни станции за ФПЧ в гр. София за периода от декември 2019 до края на септември 2026 г. Направен е анализ на териториалното разпространение на различните по големина прахови частици на територията на града. Направена е класификация на земното покритие на града на базата на данни от Sentinel-2 за 2022 и 2023 г. Направен е опит за съпоставка на пространственото разпределение на градската зеленина и това на Градски Зелени Площи (ГЗП). По-детайлно е разгледана централната градска част.*

RELATIONSHIP BETWEEN THE SPATIAL DISTRIBUTION OF DUST POLLUTION AND GREEN SPACES IN THE CITY OF SOFIA

Maria Dimitrova, Elitsa Uzunova, Ivan Stoev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: maria@space.bas.bg, elizauzunova@gmail.com, ivanstoev@space.bas.bg

Keywords: *fine particulate matter (FPM), atmospheric pollution, Urban Green Spaces*

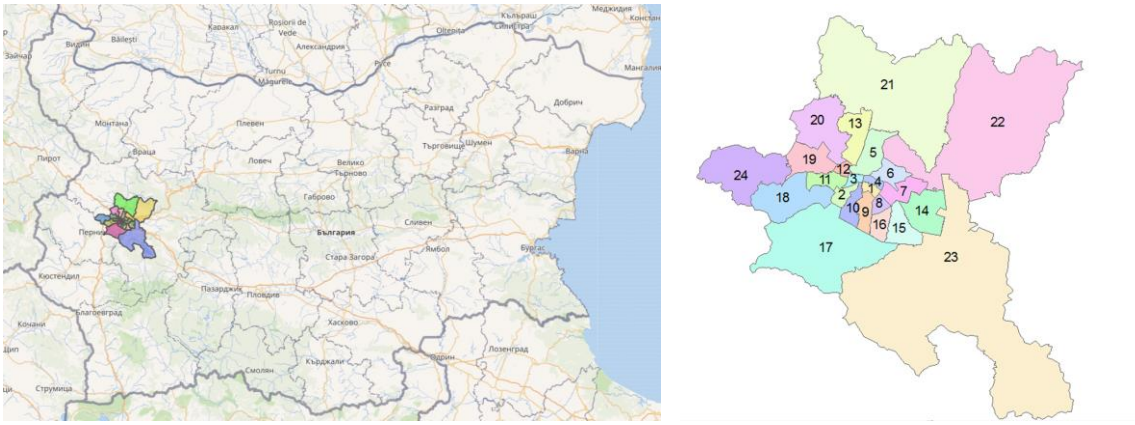
Abstract: *Data from approximately 350 amateur automatic fine particulate matter (FPM) monitoring stations in Sofia were used, covering the period from December 2019 to the end of September 2026. An analysis was conducted regarding the spatial distribution of particulate matter of various sizes across the city. A land cover classification for the city was performed based on Sentinel-2 data from 2022 and 2023. An attempt was made to compare the spatial distribution of urban vegetation with that of Urban Green Spaces. The central part of the city was examined in greater detail.*

Въведение

София е разположена в централната част на Балканския полуостров, в оградената от няколко планини Софийска котловина, която е най-голямото и едно от най-високите Подбалкански полета. София е разположена в умерения климатичен пояс и има влажен континентален климат с топло лято. Днес София е основен административен, индустриален, транспортен, културен и образователен център на страната, като в нея е съсредоточено 1/6 от промишленото производство на България.

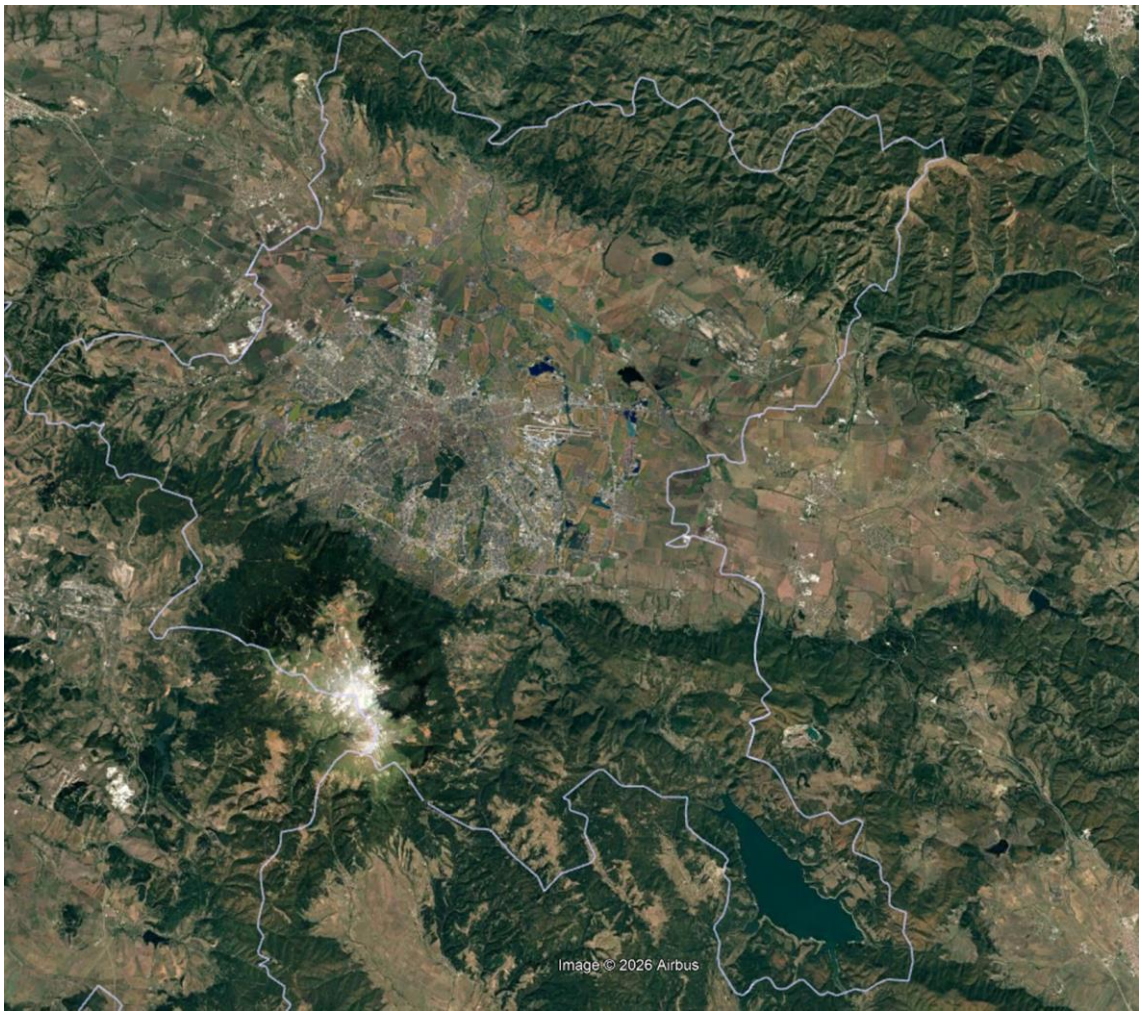
Проблем за замърсеността на въздуха на София е нейното разположение в Софийската котловина, която е оградена отвсякъде с планини, намаляващи възможността за самопочистване на атмосферата. Въздухът в столицата се замърсява предимно от фини прахови частици и азотни оксиди. След спирането на работа на металургичния комбинат „Кремиковци“, те се генерират основно от автомобилния транспорт, отоплението с твърди и течни горива, замърсените пътни настилки и някои ТЕЦ-ове. Така столичните квартали Дружба, Надежда и Павлово са с най-замърсен въздух, като за първите два освен автомобилния транспорт, важен фактор за мръсния въздух са големите ТЕЦ-ове там.

Местоположението на града и неговото административно разделение е показано на фиг. 1.



Фиг. 1. Териториално разположение и административно деление на гр. София

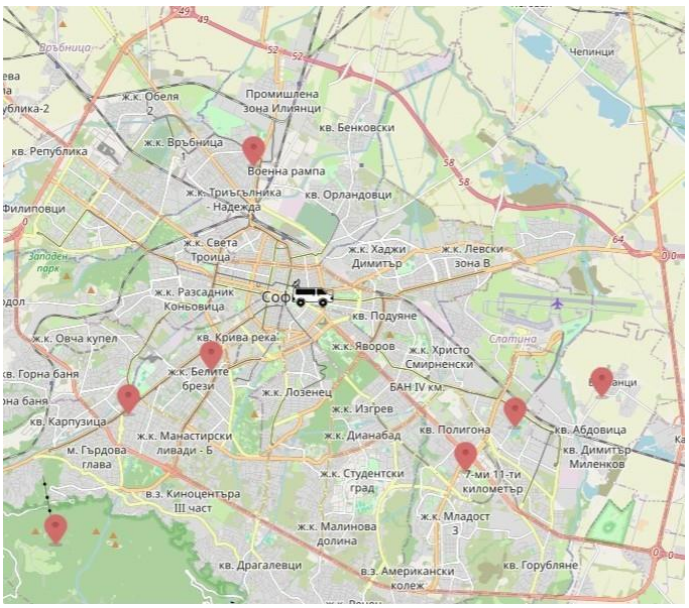
На фиг. 2 е представено сателитно изображение на града от последната година по данни от Google Earth [1].



Фиг. 2. Сателитно изображение на гр. София

Използвани данни и обработка на данните

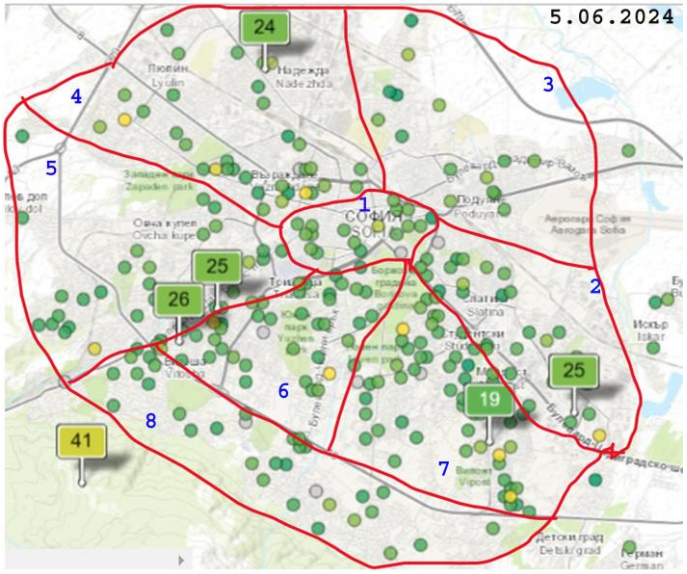
На територията на град София са разположени 5 Автоматични измервателни станции (АИС) за отчитане на качеството на въздуха [2].



Фиг. 3. Местоположение на АИС в гр. София

Освен тях от една година работят още 2 станции само за измерване на ФПЧ [3], както и мобилна станция на Столична община, която работи от есента на 2021 г., като през повечето време е паркирана в центъра на града на постоянно място. На фиг. 2 е представено разположението на тези станции. Новите 2 станции – тези в Бусманци и Требич, както мобилната станция и тази на Хиподрума дават данни за PM2.5. Останалите 5 станции мерят единствено PM10.

На територията на града са разположени между 350 и 400 броя любителски автоматични измервателни станции [4], даващи данни за ФПЧ (PM 2.5 и 10) от декември 2019 г., чието местоположение е показано на фиг. 4.



Фиг. 4. Разположение на любителските автоматични измервателни станции

Получаваните от тези станции данни са в *.csv* формат и съдържат данни на дневна база за минималната и максималната измерена през деня стойност, тяхната медиана и стандартно отклонение.

За целта на изследването са използвани данни от около 350 станции, които са сравнително пълни. За всяка станция са определени географските координати, както и средната стойност на медианата за целия период. След това стойностите са усреднени по изобразените на фиг. 4 осем района на града. За централната градска част са използвани данни от 10 станции, разположени в област 1 от фиг. 4. За всяка станция са построени графики

на сезонното изменение на PM2.5 и PM10 на база средномесечни стойности по години, след което е получен усреднен сезонен ход [5].

Изследването на растителното покритие в градската среда чрез сателитни данни, методи за машинно обучение и географски информационни системи е разгледано в предходна публикация на Узунова и съавтори [6]. Настоящото изследване разширява тази тематична област, като съпоставя пространственото разпределение на растителността с наземните измервания на концентрациите на фини прахови частици (ФПЧ) на територията на София.

За определяне на териториалното разпределение на растителността в гр. София са използвани мултиспектрални сателитни изображения от Sentinel-2, ниво на обработка Level-2A, предоставени чрез европейската програма „Коперник“ [7]. Изображенията са заснети на 22 юли 2022 г. и 22 юли 2023 г. и обхващат територията на София (MGRS зона 34TFN). Сателитният сензор MSI (Multispectral Instrument) регистрира данни в 13 спектрални канала във видимия, близкия инфрачервен (NIR) и късовълновия инфрачервен (SWIR) диапазон, с пространствена разделителна способност 10, 20 и 60 m. Използвани са атмосферно коригирани данни за повърхностната отражателна способност, като предварителната обработка включва маскиране на облачността.

Класификацията на земното покритие е извършена чрез алгоритъма Spectral Angle Mapper (SAM), описан от Kruse и съавтори [8] и реализиран в приставката Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) [9] на географската информационна система QGIS [10].

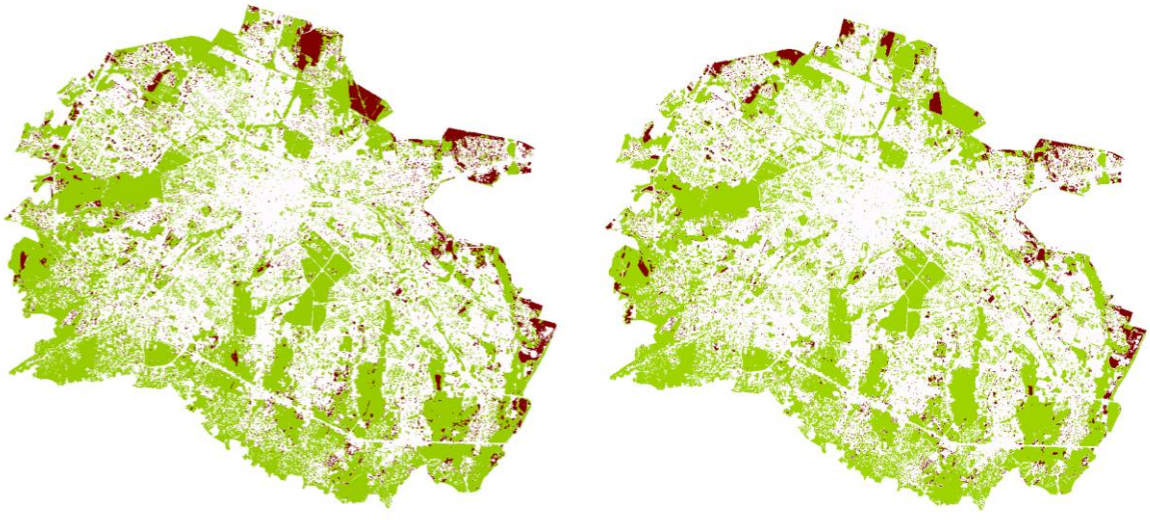
SAM е алгоритъм за контролирана спектрална класификация, който определя сходството между спектралните характеристики на пикселите и предварително дефинирани еталонни спектрални сигнатури. Методът е относително устойчив на изменения в осветеността и е подходящ за анализ на разнородна градска среда.

За обучението на класификатора са определени представителни области на интерес (ROI) чрез визуална интерпретация на спектрално хомогенни участъци от изображенията, с използване на референтни данни от ESRI World Imagery. Разграничени са четири тематични класа земно покритие: растителност, застроени площи, почва и вода. За всеки клас са използвани минимум 200 обучаващи пиксела, като приблизително 30% от извадките са отделени за независимо валидиране.

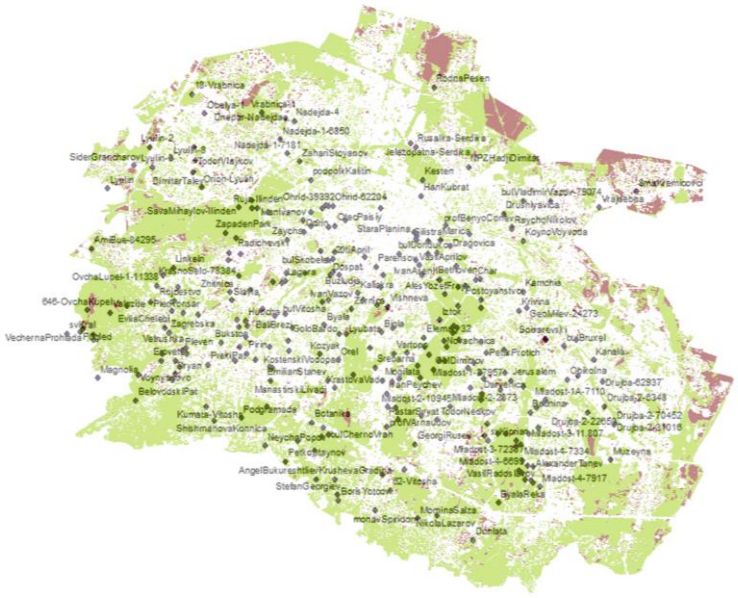
За пространственото ограничаване на анализа са използвани строителната граница на гр. София, определена в Общия устройствен план (ОУП).

Получени резултати

На фиг. 5 са представени резултатите по класове за земното покритие на гр. София за лятото на 2022 г. и 2023 г.



Фиг. 5. Земно покритие в гр. София за 2022 г. и 2023 г. съответно, класифицирано в 4 класа – застроена площ, зелени площи, гола почва и вода



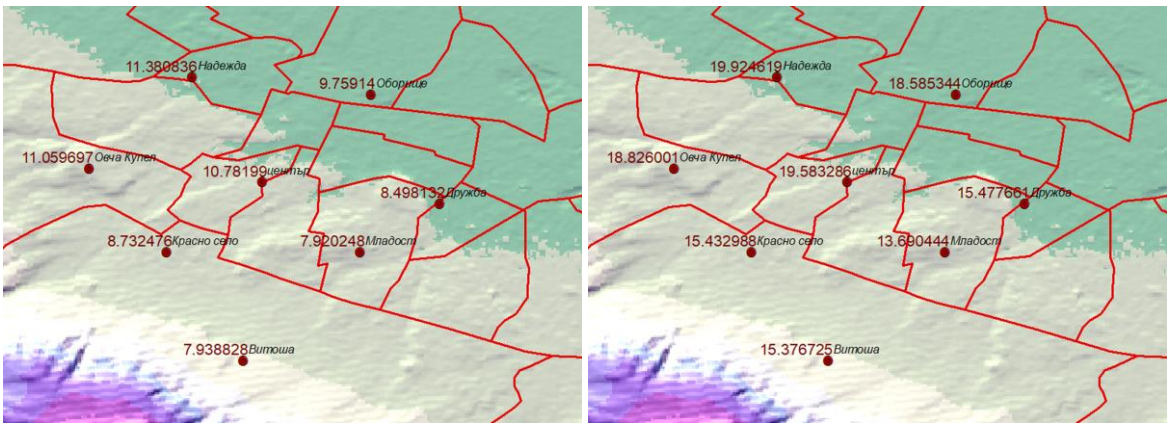
Фиг. 6. Земно покритие в гр. София за 2022 г. и разположение на АИС

На фиг. 7 са представени 4-те класа земно покритие в централната градска част заедно с разположените там АИС. Изследваната област отговаря на област 1 от фиг. 4.



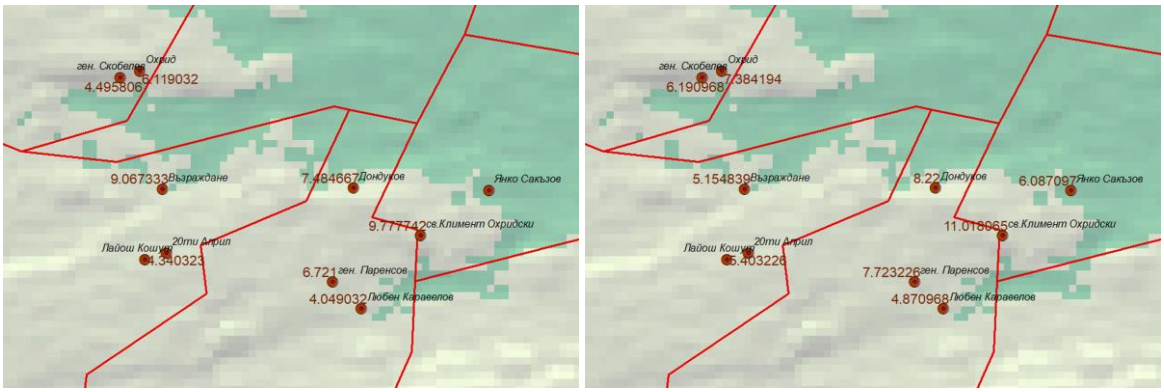
Фиг. 7. Централна градска част и разположените там АИС

На фиг. 8 са представени средните стойности на PM2.5 и 10 за осемте градски области от фиг. 4, представени в ГИС среда като средни точки на съответната област.



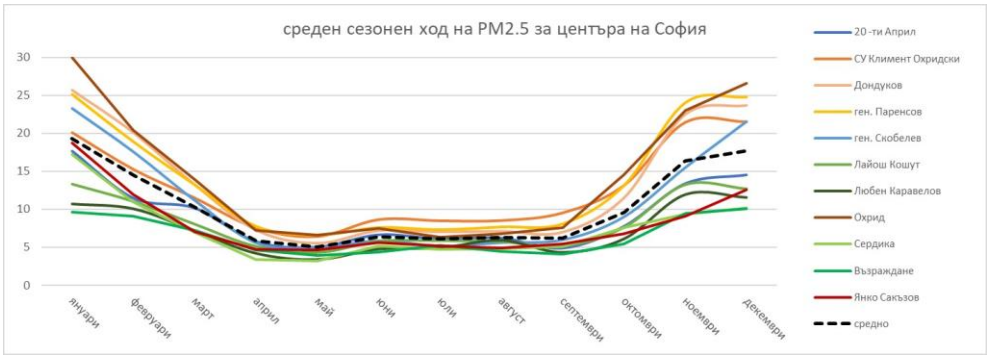
Фиг. 8. Средни стойности на PM2.5 и PM10 за отделните части на град София за периода декември 2019 г. – декември 2025 г.

На фиг. 9 са показани средните месечни стойности на PM2.5 за всяка една станция за месец юли 2022 г. и за същия месец на 2023 г. Както се вижда, стойностите са пропорционални, но по-високи.



Фиг. 9. Средномесечни стойности на PM2.5 за централната част на град София за юли 2022 г. и юли 2023 г.

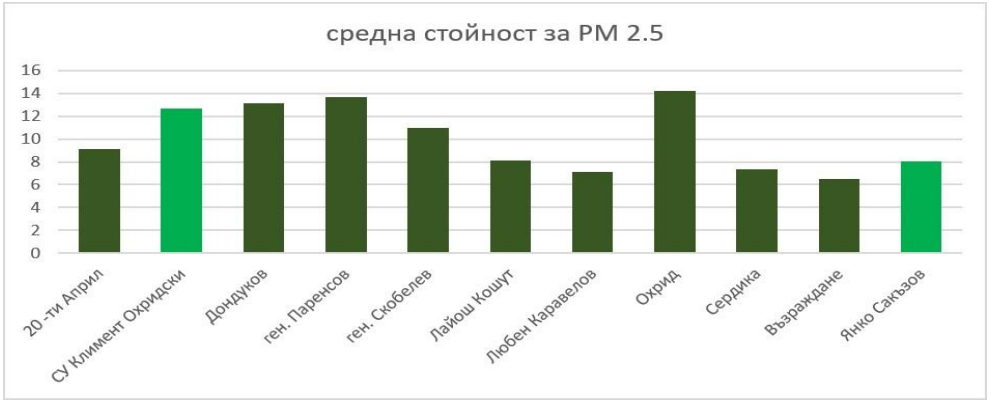
На фиг. 10 е представен сезонният ход на фините прахови частици PM2.5 в централната градска част.



Фиг. 10. Средно сезонно изменение на PM2.5 за централната част на град София

Както се вижда от представените резултати, измерените средни медианни стойности са доста високи спрямо пределно допустимите норми (ПДН), които на годишна база за PM2.5 са 25 μg/m^3.

На фиг. 11 са представени средните стойности за PM 2.5 за целия период.



Фиг. 11. Средни стойности на PM2.5 за централната част на град София

На фигурата с по-светъл цвят са отбелязани 2 станции – тези при СУ „Климент Охридски“ и ул. „Янко Сакъзов“. Интересното при първата е разположението ѝ едновременно между два градски парка и до улици със засилен трафик. Както се вижда от фиг. 10 и фиг. 11, стойностите и сезонното поведение на PM2.5 е подобно на останалите станции. Втората е разположена зад парк Заимов и в непосредствена близост до него в сравнително тих квартал. Нейните стойности са сравнително ниски.

Анализ на резултатите

Териториалното разпределение на финитe прахови частици показва най-ниски стойности в район 7 който обхваща най-общо Младост, Мусагеница, Изток, и Студентски град. На тази територия се намират и най-големите зелени паркове е града.

Максимални стойности се наблюдават в северо-западните части на града и централната градска част, където и зеленината е най-малко.

Запрашаването през лятото на 2023 г. е по-високо от това през 2022 г.

Съпоставянето на наземните измервания на ФПЧ с резултатите от сателитната класификация на земното покритие за 2022 г. и 2023 г. показва тенденция към по-ниски концентрации на прахови частици в районите с по-голям дял на растителното покритие. Тези наблюдения предполагат положителната роля на градските зелени площи (ГЗП; Urban Green Spaces – UGS) за качеството на атмосферния въздух. Следва да се отбележи, че растителното покритие, определено чрез сателитната класификация, не е напълно равнозначно на ГЗП, но позволява оценка на пространственото разпределение на растителността в градската среда. Върху концентрациите на ФПЧ влияят и други фактори, включително автомобилният трафик, отоплението, метеорологичните условия и плътността на застрояването. За установяване на количествената зависимост между растителното покритие и праховото замърсяване е необходимо провеждането на допълнителен статистически анализ.

Заключение

В заключение можем да отбележим, че данните от любителски АИС са единственият наземен източник, който ни позволява да определим някакъв пространствен и сезонен модел на замърсяването с ФПЧ.

Сезонният ход на PM2.5 напълно съответства на сезонното развитие на растителността в градската среда, като колкото по-малко е зеленината, толкова по-голямо е запрашаването.

Като бъдещо развитие на това изследване предстои сезонното и годишно изменение на ФПЧ да се съпостави с разпределението на растителността във всички райони на града. Подобно изследване следва да бъде направено и за други големи градове на страната като Пловдив и Варна.

Интегрирането на наземни измервания на фини прахови частици със сателитни данни от Sentinel-2 предоставя възможност за комплексна оценка на връзката между атмосферното замърсяване и растителното покритие в градската среда. Получените резултати показват тенденция към по-ниски концентрации на ФПЧ в районите с по-голям дял на растителността, което предполага положителната роля на градските зелени площи (ГЗП) за качеството на атмосферния въздух. Прилагането на този подход може да подпомогне мониторинга на градската среда, планирането и управлението на зелената инфраструктура и разработването на мерки за подобряване на качеството на въздуха.

Литература:

1. Google Earth - https://earth.google.com/
2. Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух. https://www.eea.government.bg/kav/
3. Столична община, качество на атмосферния въздух. https://air2.sofia.bg/airpublic/air/data/forecasts/measures/list/
4. Real-time air quality index. https://aqicn.org/station/@58867/
5. Maria Dimitrova, Пламен Тренчев. Сезонно изменение на праховото замърсяване в София по данни от любителски АИС. Proceedings Twenty-first International Scientific Conference SPACE, ECOLOGY, SAFETY 2025, 2025, ISSN:2603 – 3313, 275–280. http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202025_DOKLADI/4_Ecology/4_Dimitrova.pdf
6. Узунова, Е., Стоев, И., Мардиросян, Г. Изследване на зелените площи в градската среда с използване на методи на машинно самообучение и географски информационни системи. Proceedings Twentieth International Scientific Conference SPACE, ECOLOGY, SAFETY 2024, 2024, ISSN: 2603-3313, 242–247, http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202024_DOKLADI/PROCEEDINGS%20SES%202024.pdf.
7. Copernicus. Copernicus Earth Observation Programme. European Commission, Brussels, Belgium, 2023. https://www.copernicus.eu/en
8. Kruse, F.A.; Lefkoff, A.B.; Boardman, J.W.; Heidebrecht, K.B.; Shapiro, A.T.; Barloon, P.J.; Goetz, A.F.H. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS)—Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. Remote Sensing of Environment, 44(2–3), 145–163. https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90013-N.
9. Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python Tool for the Download and Processing of Remote Sensing Images in QGIS. Journal of Open Source Software, 6, 3172. https://doi.org/10.21105/joss.03172
10. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. https://qgis.org

ЕКОЛОГИЧНИ ЕФЕКТИ ОТ ВЪВЕЖДАНЕТО НА СТАНДАРТИ ЗА ДОПУСТИМИ ВРЕДНИ ЕМИСИИ НА АВТОМОБИЛИТЕ ВЪРХУ КАЧЕСТВОТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ ВЪВ ФРАНЦИЯ

Георги Колешански, Биляна Костова, Ралица Берберова

Нов български университет, Департамент „Природни науки”
e-mail: koleshanski83@abv.bg

Ключови думи: *цели за устойчиво развитие, качество на въздуха, стандарти Евро и Crit'Air, анализ на данни, Франция*

Резюме: *Цел на изследване са екологичните ефекти от два екологични стандарта – общоевропейския за изгорели газове Евро и специфичния за Франция Crit'Air стандарт за автомобили, движещи се в нискоемисионни зони в големите градове – върху качеството на атмосферния въздух във Франция чрез анализ на статистически данни за периода от 2021 до 2024 г.*

Използвани са статистическите данни за състоянието на автомобилите в движение във Франция – брой, средна възраст, брой автомобили, работещи на бензиново, дизелово и алтернативно гориво. Представени са и нивата на NOx, ФПЧ$_{10}$, ФПЧ$_{2.5}$ и SO_2, отделяни от автомобилите за разглеждания период.

Чрез съпоставка и анализ на данните е установено увеличение на броя автомобили в движение и средната им възраст, но и повишаване на автомобилите, задвижвани с алтернативна енергия, което води до понижаване нивата на NOx, ФПЧ$_{10}$ и ФПЧ$_{2.5}$. Единствено при емисиите SO_2 се регистрира увеличаване с 1% през четиригодишния период, като най-вероятната причина за това е понижено качество на горивата.

Резултатите показват, че във Франция има положителни ефекти за качеството на атмосферния въздух от въвеждането на двата стандарта.

THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF VEHICLE EMISSION STANDARDS ON AIR QUALITY IN FRANCE

Georgi Koleshanski, Bilyana Kostova, Ralitza Berberova

New Bulgarian University, Department of Natural Sciences
e-mail: koleshanski83@abv.bg

Keywords: *SDG, air quality, Euro standards and Crit'Air, data analysis, France*

Abstract: *The aim of the study is to examine the ecological effects of two environmental standards – the European Euro emission standards and France's specific Crit'Air standard for vehicles operating in low-emission zones in major cities – on ambient air quality in France through the analysis of statistical data from 2021 to 2024.*

The research is based on statistical data on vehicles in use in France, including total number, average age, and the count of vehicles running on petrol, diesel, and alternative fuels. The levels of NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, and SO_2 emitted by vehicles during this period were also presented.

The research is based on statistical data regarding vehicles in use in France, including their total number, average age, and breakdown by fuel type (petrol, diesel, and alternative fuels). The levels of NOx, PM_{10}, and $PM_{2.5}$, and SO_2 emitted by vehicles during this period are also presented.

A comparison and analysis of the data show that while the total number, average age, and share of alternative fuel vehicles increased, NOx, PM_{10}, and $PM_{2.5}$ levels declined. However, SO_2 emissions rose by 1% over the four-year period, driven primarily by higher sulfur content in fuels.

The results indicate that the implementation of both standards has had positive effects on ambient air quality in France.

Въведение

Замърсяването на въздуха е сред най-дискутираните екологични рискове за човешкото здраве. В големите градове автомобилите са сред основните замърсители на атмосферния въздух. Въпреки дългогодишните усилия и по-строгото регулиране при производството и експлоатацията на превозни средства, което доведе до намаляване на емисиите на ФПЧ и NOx, тези подобрения трудно компенсират замърсяването, поради нарастващия брой превозни средства Поради това темата за замърсяване на въздуха е пряко застъпена в целите за устойчиво развитие на ООН – Глобална цел 3: Добро здраве и благосъстояние, Глобална цел 11: Устойчиви градове и общности и др. [1–4, 6–8, 18–21].

Емисиите от отработени газове са смес от различни газове и частици, отделяни от превозните средства, когато двигателят с вътрешно горене (ДВГ) работи, тези емисии влияят на качеството на въздуха. ДВГ изгарят течни или газообразни горива, за да преобразуват химическата енергия в механична. Автомобилите в движение генерират емисии на азотни оксиди (NOx), серен диоксид (SO_2), фини прахови частици (ФПЧ), които според размера си се класифицират като $ФПЧ_{10}$ (с диаметър по-малък от 10 μm) и $ФПЧ_{2.5}$ (с диаметър по-малък от 2.5 μm) и др. [5–6, 11].

С цел намаляване на това замърсяване, през 1992 г. Европейският съюз (ЕС) въвежда минимални европейски стандарти за емисии на отработени газове заедно с приемането на разпоредби за производството на нови автомобили. Тези стандарти задават допустими стойности на изгорелите газове на моторните превозни средства, пускани на европейския пазар. Автомобилите, произведени преди въвеждането на Евро стандартите за вредни емисии, често имат двигатели, които отделят високи количества замърсители. С цел намаляване на замърсяването на атмосферния въздух се въвеждат Евро категории за отработените газове при автомобилите. До 2024 г. са въведени 6 екологични стандарта при производството на нови автомобили (Табл. 1). За автомобилите с двигатели с вътрешно горене, работещи на бензиново и дизелово гориво, са въведени стандартите от Евро 1 до Евро 6, които са с различни параметри, като целта е да се намалят нивата на вредни емисии от отработени газове, главно на NOx, ФПЧ, както и на въглеводороди (HC), брой частици (PN).

Таблица 1. Евро категории за отработените газове при автомобилите

Евро 1	Определя ограниченията за емисиите на CO, HC и NOx
Евро 2	Намалява пределните стойности на емисиите на CO, HC и NOx
Евро 3	Допълнително намалява емисиите на CO, HC и NOx, като въвежда ограничения и за ФПЧ
Евро 4	Определя строги ограничения за емисиите на CO, HC, NOx и ФПЧ
Евро 5	Въвежда по-строги ограничения на емисиите NOx и ФПЧ, особено за дизеловите двигатели
Евро 6	Определя изключително ниски граници за емисиите на NOx и ФПЧ, особено за дизелови превозни средства, и по-строги ограничения за бензиновите двигатели

В допълнение към тези Евро стандарти, във Франция през 2017 г. се въвежда и допълнителен екологичен стандарт за автомобили, движещи се в нискоемисионни зони в големите градове – Crit'Air (сертификат за качество на въздуха). Във Франция са определени специфични зони, през които могат да преминават само превозни средства, на които е поставен стикер Crit'Air, или още наречен винетка. Системата класифицира превозните средства според годината на производство, вида гориво и замърсяващите емисии на фини частици и азотни оксиди отново в шест категории (Фиг. 1) [9]. Чрез тази система се регулира достъпа на превозни средства до определени зони или райони – той може да бъде ограничен за превозни средства от определен екологичен клас както през цялото време, така и само в определени дни или периоди.

Системата Crit'Air разпределя превозните средства в шест категории, като в общи линии те са в съответствие с европейските стандарти за емисии Евро. Френският стандарт Crit'Air дава допълнителна възможност за проследяване на нивата на SO_2, който не се отчита при евростандартите Евро. Стикерът Crit'Air е валиден за целия експлоатационен живот на превозното средство. Най-малко замърсяващите превозни средства обикновено имат право да се движат по-свободно от тези, които отделят повече замърсители [12]. Превозни средства, които са регистрирани преди 1997 г., или такива, които не отговарят на минималните стандарти, нямат право на стикер Crit'Air [10].

Допълнителните екологични мерки за подобряването на атмосферния въздух във Франция са основание за проучване на качеството на въздуха именно в тази държава от ЕС, като са проследени основните замърсители, използвани за Crit'Air за времеви период от четири години, за който са публикувани официални статистически данни. Целта на разработката е проучване на екологичните ефекти от въвеждането на стандартите Евро и Crit'Air за допустими вредни емисии на автомобилите върху качеството на атмосферния въздух във Франция.



Crit'Air 0/E – изцяло електрически превозни средства и автомобили, задвижвани с водород. Те са най-чистите и са изложени на най-малко ограничения

Crit'Air 1 – модерни бензинови превозни средства (регистрирани от януари 2011 г.) и хибридни превозни средства. Те отделят много малко замърсяване

Crit'Air 2 – обхваща по-нови дизелови превозни средства (от януари 2011 г.) и по-стари бензинови превозни средства. Много чуждестранни автомобили попадат в тази категория

Crit'Air 3 – включва по-стари дизелови превозни средства (2006–2010 г.) и по-стари бензинови превозни средства

Crit'Air 4 – по-стари дизелови превозни средства (2001–2005 г.)

Crit'Air 5 – най-замърсяващите дизелови превозни средства (1997–2000 г.)

Фиг. 1. Категории стикери Crit'Air

Обект и метод

Обект на проучване е изменението в състоянието на автомобилите в движение във Франция и отделени атмосферни замърсители от тях за периода от 2021 до 2024 г. въз основа на официални статистически данни [13–17].

Статистическите данни за състоянието на автомобилите в движение във Франция включват брой автомобили, средна възраст на автомобилите, брой автомобили, работещи на бензиново, дизелово и алтернативно гориво, изменението на съотношението им през годините, както и разпределението на автомобилите през годините според Crit'Air сертификата.

Статистическите данни за състоянието на атмосферния въздух във Франция обхващат емисии на NOx, SO_2, $ФПЧ_{10}$ и $ФПЧ_{2.5}$ за четирите години.

Въз основа на систематизиране, интерпретация и анализ на тези данни се проследява изменението в състоянието на атмосферния въздух във Франция, с което може да се докаже ефективността от въведените екологични стандарти за допустими вредни емисии на автомобилите в страната (европейски стандарт за изгорели газове Евро и Crit'Air френски екологичен стандарт за автомобили, движещи се в нискоемисионни зони в големите градове).

Резултати и дискусия

Официалните данни показват увеличение с 1 млн. на броя автомобили в движение във Франция от 2021 г. (38,7 млн.) до 2024 г. (39,7 млн.). Средната възраст на автомобилите в движение също нараства с 1 година – от 10,5 г. през 2021 г. до 11,5 г. 2024 г. Отчитат се 3,2% намаление в броя на автомобилите, работещи на бензиново и дизелово гориво – през 2021 г. те са 97,7% от всички автомобили в движение, докато през 2024 г. – 94,5%. (Фиг. 2).

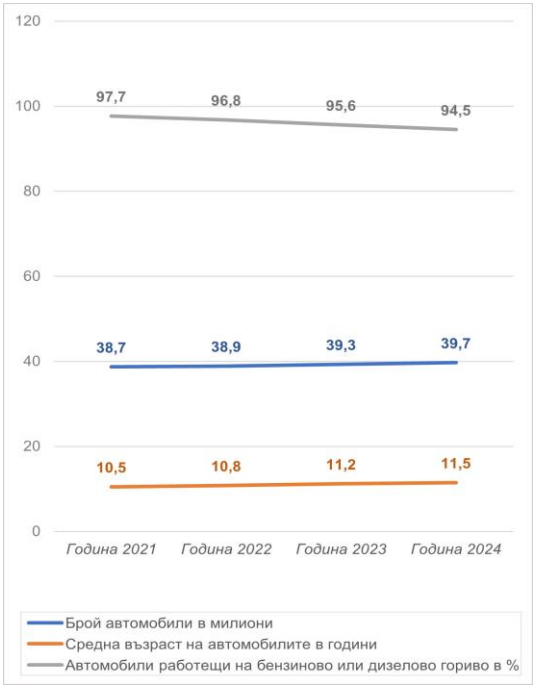
От 2021 до 2024 г. по отношение на автомобилите в движение се отчита намаляване на дизеловите автомобили и повишаване на броя на тези, използващи бензин и алтернативна енергия, както следва: използващите дизелово гориво намаляват с 6,7% (от 55,5% през 2021 г. до 48,8% през 2024 г.); има увеличение с 3,5% на тези, работещи с бензиново гориво – от 42,2% в началото на периода до 45,7% в края на периода; броят на автомобили в движение, работещи с алтернативна енергия се увеличава с 3,2% – от 2,3% през 2021 г. до 5,5% през 2024 г. (Фиг. 3). По отношение на автомобилите, работещи с електрическо задвижване, за тези четири години се установява ръст от 1,9% – от 1% през 2021 г. до 2,9% през 2024 г. (Табл. 2).

Таблица 2. Процент на автомобилите с електрическо задвижване във Франция в периода от 2021 г. до 2024 г. (по данни от SDES)

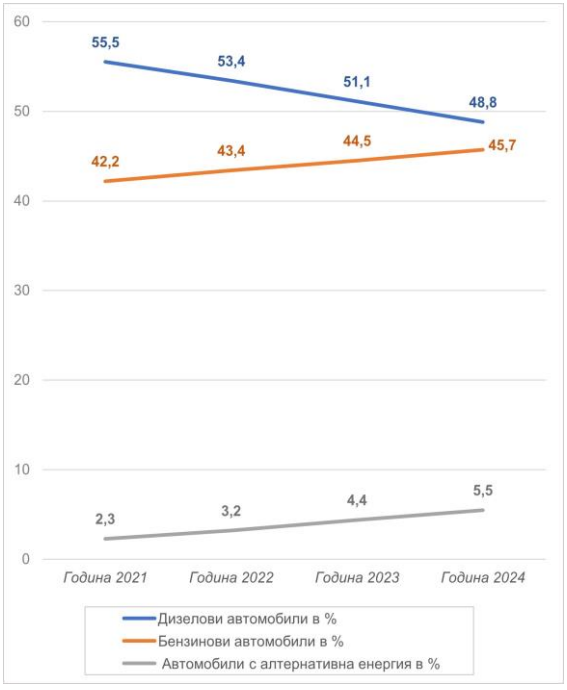
Година	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
Електрически автомобили (%)	1,0	1,5	2,2	2,9

Установява се увеличение с 1,9% на автомобили в движение в категория Crit'Air E (през 2021 г. те са 1%, а през 2024 г. – 2,9%), а за тези в категория Crit'Air 1 увеличението е със 7,7% – от 28% през 2021 г. до 35,7% през 2024 г. Докато през 2021 г. автомобилите в движение в категория Crit'Air 2 са 37% от общия брой автомобили в движение, то през 2024 г. този процент вече е 35, т.е. има спад с 2%. Автомобилите, имащи категория Crit'Air 3, намаляват с 4.1% в периода 2021–2024 г. – от 22% на 17,9%. Спад от 1,8% се отчита и при автомобилите в движение в категория Crit'Air 4 (от 7% през 2021 г. до 5,2% през 2024 г.). През 2021 г. автомобилите в категория Crit'Air 5 и некласифицираните във Франция са 5%, докато през 2024 г. те намаляват до 3,4%, което е спад от 1,6% (Фиг. 4).

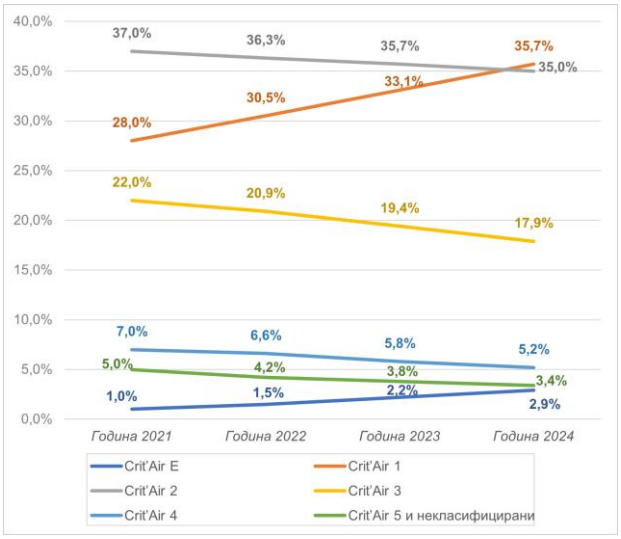
Спадът на емисиите от замърсители във въздуха на NOx от автомобилния транспорт е 6% (от 53% през 2021 г. до 47% през 2024 г.). Отчетеното намаление на емисиите от замърсители във въздуха на ФПЧ е както следва: за $ФПЧ_{10}$ има намаление от 3% – от 14% през 2021 г. до 11% през 2024 г., докато за $ФПЧ_{2.5}$ спадът е с 5% – от 15% през 2021 г. до 10% през 2024 г. За разлика от останалите параметри, които са обект на мониторинг, емисиите от SO_2, продуцирани от автомобилен транспорт се увеличават с 1%, като през 2021 г. те са били 2%, а през 2024 г. вече са 3%. (Фиг. 5).



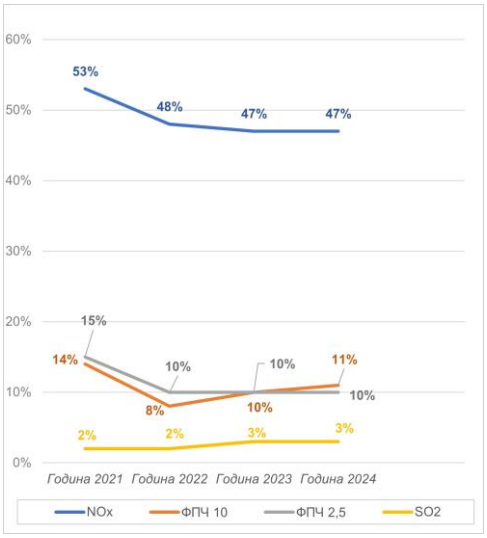
Фиг. 2. Брой автомобили, средната им възраст и вид двигател за периода 2021–2024 г. във Франция (по данни от SDES)



Фиг. 3. Процент автомобили, използващи бензин, дизел и алтернативно гориво за периода 2021–2024 г. във Франция (по данни от SDES)



Фиг. 4. Процент на автомобили по критерии Crit'Air за периода 2021–2024 г. във Франция (по данни от SDES)



Фиг. 5. Емисии на NOx, $ФПЧ_{10}$, $ФПЧ_{2.5}$ и SO_2 за периода 2021–2024 г. във Франция (по данни от SDES)

Резултатите от проучването на официалните данни за Франция за разглеждания период 2021–2024 г. показват, че чрез въвеждането на стандарти за допустими вредни емисии на автомобилите е постигнат положителен ефект за качеството на атмосферния въздух в страната, независимо че за тези четири години, от 2021 до 2024 г., има увеличение както в броя на автомобилите в движение, така и в средната възраст на експлоатация (Фиг. 2). Подобрението на състоянието на въздуха е свързано пряко с намаляването на автомобилите, задвижвани с

класическо гориво (бензиново и дизелово). Това намаляване е за сметка на повишаването на процента автомобили, ползващи алтернативна енергия и електрическите автомобили (Табл. 2, Фиг. 3). За тези четири години електрическите автомобили в движение във Франция са се увеличили почти три пъти, а те са с нулеви емисии, отделяни от изпускателната система на автомобила при експлоатация (Табл. 2). В допълнение, автомобилите в движение във Франция, отделящи по-малко вредни емисии и отговарящи на критериите Crit'Air 0/E и Crit'Air 1 са се увеличили, като съответно за същия период от време са намалели автомобилите, отговарящи на критериите Crit'Air 2, 3, 4, 5 и некласифицирани, които отделят повече вредни емисии в атмосферата (Фиг. 4). За разглеждания период всички предприети мерки водят до понижаване на емисиите замърсители на въздуха NOx, $ФПЧ_{10}$, $ФПЧ_{2.5}$, изпускани от автомобилите в движение във Франция. Обратно – за същия период от време емисиите на SO_2 се покачват (Фиг. 5).

За да отговарят на екологичните стандарти за вредни емисии ДВГ на автомобилите е необходимо да разполагат с редица технологии, които да подобрят системите за обработка на въздух, за впръскване на гориво, за последваща обработка на отработените газове, за качеството на горивото и др. Физичните и химични свойства на горивото оказват влияние върху емисиите на отработени газове от автомобилите. Съдържанието на сяра е един важен параметър сред свойствата на дизеловото гориво и е ключов контролиран фактор за горивния стандарт [11]. Сярата е един от естествените примеси на дизеловото гориво, като при изгаряне образува SO_2, създавайки емисии, които влияят неблагоприятно върху атмосферния въздух, екосистемите и човешкото здраве [6].

Главен източник за емисии от SO_2 са дизеловото и бензиновото гориво. Отстраняването на сярата от бензиновите и дизеловите горива е от решаващо значение за отделяните от превозните средства емисии. Емисиите на SO_2 се увеличават с натоварването на двигателя, малкото количество гориво в цилиндъра при ниско натоварване на двигателя води до малка концентрация на сяра в сместа „въздух-гориво“ и ниски емисии на SO_2 в отработените газове на двигателя. Емисиите на SO_2 се увеличават с повече впръскано гориво в цилиндъра. Емисиите на SO_2 намаляват със съдържанието на сяра в горивото. Това показва, че сярата в горивото има пряко въздействие върху емисиите на SO_2 от двигателя [11].

Въвеждането на стандарти за допустими вредни емисии на автомобилите в движение върху качеството на атмосферния въздух във Франция е пряко свързано с непрекъснатото увеличаване на автомобилите в движение и увеличаването на средната им възраст, което вероятно се дължи на световната икономическа обстановка, която възпира потребителите от покупка на нови и по-екологични превозни средства. Въвеждането на тези стандарти цели: да се намали процента на автомобилите с ДВГ в движение и процента на автомобилите с дизелови двигатели в движение; да се увеличи процента на автомобилите с бензинови двигатели в движение спрямо дизеловите двигатели; да се увеличи процента на автомобилите, задвижвани с алтернативна енергия и тези на автомобилите с Plug-in хибридни двигатели, с електрически двигатели и водородни двигатели в движение; да се повиши процента на автомобилите с най-високите Евро категории и най-ниските Crit'Air категории.

Въвеждането на стандарти за допустими вредни емисии на автомобилите за подобряване на качеството на атмосферния въздух е приложимо благодарение на разширяването на възможностите за разработка и вграждане на нови технологии в МПС като: автомобили, използващи електрическа и друга алтернативна енергия; използване на филтри за твърди частици (DPF) при дизеловите автомобили; подобряване на качеството на горивата; използване на иновативни двигатели, вграждани в автомобилите; използване на катализатори в изпускателните системи на автомобилите; вграждане на системи за рециркулацията на отработените газове (EGR); вграждане на системи за селективна каталитична редукция (SCR); оптимизация на аеродинамиката и теглото на автомобилите; системи за автоматично изключване на двигателя при престой.

Заключение

Въведените във Франция стандарти Crit'Air и Евро са част от екологичните мерки по отношение на качеството на атмосферния въздух и подобряване на градската среда.

Независимо от общото повишаване на броя на автомобили в движение във Франция и покачването на средната им възраст чрез въведените стандарти са постигнати положителни ефекти за качеството на атмосферния въздух като са понижени нивата на замърсяване с NOx, $ФПЧ_{10}$, $ФПЧ_{2.5}$ чрез: намаляване на процента автомобили с ДВГ; повишаване на автомобилите, задвижвани с електричество и алтернативна енергия; цялостно повишаване на броя автомобили от екологичните категории Crit'Air. Единственият показател, по който няма подобрение е съдържанието на SO_2 във въздуха, което се дължи на по-високо съдържание на сяра в горивото. Отстраняването на сярата от бензиновите и дизеловите горива ще бъде от решаващо значение за контрола на емисиите от превозните средства.

Предимствата на Франция от въвеждането на двата екостандарта са:

- чрез стандарта Crit'Air се проследяват нивата на SO_2, който не се следи от евростандартите за изгорели газове Евро;
- подобряването на качеството на атмосферния въздух, а оттам и опазване на здравето на хората в големите градове;
- възможност на местните власти да въвеждат ограничения по време на пикове на замърсяване, като ограничават движението на автомобили с по-висока категория стикери (например Crit'Air 4 и 5), което не се контролира от екологичните изисквания, въведени със стандарта Евро;
- цялостно подобряване на качеството на въздуха, градската среда и качеството на живот, което е в отговор на целите за устойчиво развитие.

Благодарности

Резултатите са получени с подкрепата на Департамент „Природни науки" в НБУ като част от дипломна теза в БП „Екология и опазване на околната среда ДО".

Литература:

1. ЕСП-2018, Европейска сметна палата. Специален доклад 23/2018 „Замърсяване на въздуха – здравето ни все още не е достатъчно защитено": https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/bg/#box1
2. ЕСП-2025, Европейска сметна палата. Специален доклад 02/2025 „Градско замърсяване в ЕС – по-чист въздух в градовете, но шумовото замърсяване остава", Служба за публикации на Европейския съюз, 2025 г.: https://www.eca.europa.eu/bg/publications/sr-2025-02
3. ИАОС-ОВКАЗЧЗ, Изпълнителна агенция по околна среда. Оценка на влиянието на контролираните атмосферни замърсители върху човешкото здраве: https://eea.government.bg/ocenka-vliyanie
4. ИАОС-СИНКАВ, Изпълнителна агенция по околна среда. Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух: https://eea.government.bg/kav/questions/
5. Chakraborty, S., B. Kramer, B. Kroposki. 2009. A review of power electronics interfaces for distributed energy systems towards achieving low-cost modular design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(9), 2323-2335. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.005
6. Daemme, L., de Arruda Penteado, R., Silva, K., Errera, M., M. Z. Zotin, F. 2014. Regulated and Non-Regulated Emissions from a Light-Duty Diesel Car Fueled with Different Diesel Sulfur Content, SAE Technical Paper 2014-36-0110: https://doi.org/10.4271/2014-36-0110
7. EEA, European Environment Agency, Europe's Environment 2025, Air pollution and impacts on human health,: https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/thematic-briefings/environment-and-human-health/air-pollution-and-impacts-on-human-health
8. Miner, P., Barbara M. Smith, Anant Jani, Geraldine McNeill, Alfred Gathorne-Hardy. 2024. Car harm: A global review of automobility's harm to people and the environment. *Journal of Transport Geography*. 15. 103817: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2024.103817
9. Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité et des Négociations internationales sur le climat et la nature, France: https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/certificats-qualite-lair-critair
10. Official website of the Crit'Air sticker: https://www.certificat-air.gouv.fr/
11. Pi-Qiang Tan, Zhi-Yuan Hu, Di-Ming Lou. 2009. Regulated and unregulated emissions from a light-duty diesel engine with different sulfur content fuels. *Fuel*, 88(6), 1086–1091: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.031
12. RAC, Royal Automobile Club: https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/
13. SDES, Les rejets de polluants dans l'air: résultats complémentaires du bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2021: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-rejets-de-polluants-dans-lair-2021
14. SDES, Les rejets de polluants dans l'air : résultats complémentaires du bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2022: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-rejets-de-polluants-dans-lair-resultats-complementaires-du-bilan-de-la-qualite-de-lair
15. SDES, Les rejets de polluants dans l'air : données détaillées du bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2023: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-rejets-de-polluants-dans-lair-donnees-detaillees-du-bilan-de-la-qualite-de-lair-exterieur-en-0
16. SDES, Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2024: https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/8742/download?inline
17. UNDP, United Nations Development Programme: https://www.undp.org/sustainable-development-goals
18. UN-SDG, United Nations, Sustainable Development Goals: https://sdgs.un.org/goals
19. WHO, World Health Organization. Air Pollution: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
20. WHO-GAQG, World Health Organization. 2021. WHO Global Air Quality Guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/345329

ПРЕСНОВОДНИТЕ РЕСУРСИ В БЪЛГАРИЯ И ФАКТОРИ ЗА ТЯХНОТО СЪСТОЯНИЕ

Йоана Чомпалова, Биляна Костова, Ралица Берберова

Нов български университет, Департамент „Природни науки”
e-mail: yoanatchompalova@gmail.com

Ключови думи: *цели за устойчиво развитие, пресноводни ресурси, контролиращи фактори, България*

Резюме: *Съпоставка на официални статистически данни за изменението на количеството водни ресурси и на факторите, които ги контролират, показва връзката на количеството валежи и влиянието на климатичните фактори върху количеството пресноводни ресурси в България. В допълнение с количеството валежи и климатичните фактори, влияние върху количеството водни ресурси оказват и геоложките особености на страната. Геоложката обстановка оказва силно влияние върху водния баланс, особено в комбинация с климатичните промени.*

FRESHWATER RESOURCES IN BULGARIA AND FACTORS AFFECTING THEIR STATUS

Yoana Tchompalova, Bilyana Kostova, Ralitza Berberova

New Bulgarian University, Department of Natural Sciences
e-mail: yoanatchompalova@gmail.com

Keywords: *SDG, freshwater resources, regulatory factors, Bulgaria*

Abstract: *Comparison of official statistical data on changes in the quantity of water resources and the factors that control them demonstrates the relationship between precipitation levels and the influence of climatic factors on the quantity of freshwater resources in Bulgaria. In addition to precipitation levels and climatic factors, the quantity of water resources is also influenced by the geological characteristics of the country. The geological setting has a strong influence on the water balance, particularly in combination with climate change.*

Въведение

Водата е ключово условие за съществуването както на хората, така и на всички живи организми и екосистеми. Тя е и стратегически ресурс за функционирането на икономиката. Прясната вода, наречена още „сладка“, е възобновим, но ограничен природен ресурс. Нейното възстановяване е възможно единствено чрез естествения воден цикъл, който включва освен водата в атмосферата и на земната повърхност, така и съхраняваните в почвата и скалните пластове подземни води, както и водата, която циркулира в живите организми, включително растения и животни, като част от комплексната динамика на природата. Прясната вода не може да бъде произведена изкуствено или заменена с друго вещество.

Водните ресурси имат редица специфики: те са част от единната хидросфера и въпреки че са възобновяеми, се характеризират с неравномерно разпределение във времето и пространството. Същевременно, подобно на други природни ресурси, те могат да се използват многоцелево – например за питейни нужди, производство, напояване, електроенергия, транспорт, риболов и отдих. Възможно е също така тяхното качество да бъде подобрявано и да се извършва пренос между различни територии [6, 7, 9, 10, 38].

Макар общото количество вода в хидросферата да остава постоянно, неравномерното й разпределение, както и нейното замърсяване оказват сериозни негативни последици върху питейните водоизточници, екосистемите и здравето на хората. Климатичните промени изострят

необходимостта от по-устойчиво управление на водните ресурси, насочено към намаляване на загубите, ограничаване на замърсяването и повишаване на ефективността при тяхното използване. Заради ограничеността на пресноводните ресурси се прогнозира, че до 2030 г. глобалният недостиг на прясна вода може да достигне 40%. Поради това една от глобалните цели за устойчиво развитие на Организацията на обединените нации (ООН) е пряко свързана с решаването на този проблем – Глобална цел 6: Чиста вода и санитарно-хигиенни условия. Според данни на ООН към 2025 г. два милиарда души по света все още нямат ежедневен достъп до сигурна и безопасна питейна вода, което потвърждава необходимостта от спешни мерки за преодоляване на този недостиг [2, 4, 5, 37, 38, 39, 40].

България разполага с относително значими запаси от пресни води в сравнение с други европейски държави както по абсолютен обем, така и на човек от населението. Въпреки това, те са неравномерно разпределени в цялата страна и по сезони [8, 10, 11, 25].

Според данни на Националния статистически институт (НСИ), площта на водните обекти в България за 2023 г. възлиза на 201040 ha (2093 km²), което представлява около 1.8% от територията на страната [14, 24]. България разполага със значителни пресноводни ресурси – приблизително 99.7 млрд. m³ годишно, като около 75% от тях се осигуряват от р. Дунав. Дунавските води имат предимно транзитен характер и са ограничено използваеми за питейни нужди, поради което страната реално разчита основно на оставащите 25% вътрешни ресурси, формирани от баланса между валежите и изпарението.

Количеството на водните ресурси е пряко свързано с климатичните промени и се контролира от фактори като валежи, температурни колебания и евапотранспирация. Количественото и пространственото колебание, както и времевото разпределение на валежите, в комбинация с измененията в температурата на въздуха и евапотранспирацията, оказват непосредствено влияние върху всички елементи на хидроложкия цикъл и режима на водите. Засушаването също оказва пряко и значително влияние върху наличните пресноводни ресурси чрез намаляването на речния отток и подпочвените водни запаси [3, 27, 30, 31].

В проучването се проследява изменението на основните фактори, определящи водния баланс – валежи, температура, евапотранспирация, воден отток, суши и засушавания – и ги съпоставя с количествените промени в повърхностните и подземните води. Проучването е въз основа на официални статистически данни за България за периода 2013–2023 г. Целта е да се установят закономерностите и зависимостите, които определят водния баланс на страната. В изследването са разгледани и допълнителни влияещи фактори като геоложките особености и антропогенното натоварване, които допринасят за пространствената и сезонна неравномерност на водните ресурси.

Материали и методи

За установяване на основните зависимости между климатичните фактори и наличността на пресни води в България е направена съпоставка между изменението на количеството на водните ресурси и на количеството валежи и обема на годишния отток по статистическите данни за периода 2013–2023 г., както и съпоставка на влиянието на средногодишните температури и засушаването върху динамиката на водните ресурси. Изборът на този период се базира на наличието на официални статистически данни за всички ключови фактори, необходими за проучването, като същевременно 11-годишният период позволява по-представително и надеждно наблюдение на тенденциите в изменението на пресноводните ресурси в страната. Наличните данни за суши и засушавания обхващат периода до 2022 г., което не оказва значително влияние върху рамката за анализ и интерпретация на резултатите.

Резултати и дискусия

Данните за количеството валежи за периода 2013–2023 г. (Табл. 1) отчитат значително колебание, което свидетелства за висока междугодишна изменчивост на климатичните условия в страната. По-сухите години, 2019, 2020 и 2022 г., са предшествани от години с по-обилни валежи – 2014, 2015, 2017 и 2018 г., като разликата достига до около 5000 млн. m³ между годините. Въпреки това, подхранването на водоносните слоеве в страната за периода варира между 4650 и 5543 млн. m³ годишно, като в годините се отчита постепенно нарастване и стабилизиране на стойностите. Средномногогодишните данни за 1981–2023 г. показват устойчива средна стойност около 5860 млн. m³, което отразява стабилност на естествените процеси на подхранване.

Същевременно, за разглеждания период се отчита постепенно намаляване (с 2%) на средномногогодишния обем на пресноводните ресурси в страната (включващ външния приток на р. Дунав) (Табл. 1), което показва, че има намаляване на водния потенциал през последното

десетилетие. В Западнобеломорския район след 2015 г. се забелязва лека тенденция към спад на обема на пресноводни ресурси (с и без включен външен приток) (Табл. 2), вероятно поради климатични колебания и намален приток. Тези колебания са свързани с промените в температурата, водещи до по-висока евапотранспирация и зачестяване на засушаванията, характерни за последните години от разглеждания период.

Когато се извади външния приток, средномногогодишният обем на наличните пресноводни ресурси намалява значително – като най-нисък (13217 млн. m³) е отчетен за 1981–2017 г. (Табл. 1). Също така, Дунавският район вече не е на първо, а е на второ място по обем на пресноводни ресурси, което може да се свърже с географските и хидрологичните особености на района, които влияят на водния баланс. Интересно е, че 2017 г. е на трето място по най-ниски стойности на общ обем на налични възобновими пресноводни ресурси за годината (без включен външен приток), а същевременно тази година е отчетена като година с по-обилни валежи, заедно с 2018 г., в сравнение с последвалите 2019 г., 2020 г. и 2022 г. (изключение е 2021 г. която е с много обилни валежи).

Таблица 1. Количествени данни за наличието на пресноводни реусрси в България за периода 2013–2023 г. (по данни от НСИ) [18, 23–24]

Година	Средномногогодишен обем на пресноводни ресурси вкл. външен приток / млн. m³ *	Средномногогодишен обем на пресноодни ресурси без външен приток на р. Дунав/ млн. m³ *	Пресноводни ресурси, вкл. притока от р. Дунав за годината/ m³/чов.	Пресноводни ресурси, без приток от р. Дунав за годината/ m³/чов.	Общо налични възобновими пресни водни ресурси в Б-я за годината/ млн. m³	Подхранване във водоносния слой за годината – средногодишно/ млн. m³ *	Налични подземни води, достъпни за годишно използване за година-средногодишно/ млн. m³ *
2013	101000*	15800*	1000	2000	109659	4650*	4650*
2014	101187*	16122*	14000	2232	118740	5526*	4776*
2015	101323*	16538*	14116	2304	105982	5543*	4793*
2016	101317*	15884*	-	2228	102083	5451*	5137*
2017	100782*	13217*	15839	2143	82095	5849*	5393*
2018	99789*	16058*	14300	3500	100092	5872*	5418*
2019	100364*	15941*	12166	1652	84870	5847*	5391*
2020	99853*	15789*	11520	1460	79877	5846*	5393*
2021	99841*	15884*	14517	2362	99398	5876*	5 420*
2022	99254*	15884*	11278	1962	74926	5858*	5402*
2023	99441*	-*	16544	1911	106656	5864*	5409*

**за периода от 1981 г. до съответната година в таблицата – например 1981-2013, 1981-2014 и т.н.*

Таблица 2. Общо възобновими пресни водни ресурси по басейнови райони за управление на водите, вкл. външен приток на р. Дунав (дългосрочна средногодишна млн. m³) (по данни от НСИ) [15–22]

***Период*/ Район**	**Дунавски**	**Черноморски**	**Източнобеломорски**	**Западнобеломорски**
1981–2013	90387	1672	5622	3327
1981–2014	90436	1681	5720	3350
1981–2015	90258	1710	5943	3412
1981–2016	90607	1704	5944	3062
1981–2017	90145	1715	5887	3035
1981–2018	89040	1758	5942	3049
1981–2019	89708	1741	5895	3020
1981–2020	89708	1741	5895	3020
1981–2021	89249	1701	5880	3011

Противоположна е ситуацията през 2014 г. (Табл. 1), когато са отчетени най-големите възобновими пресноводни ресурси (118740 млн. m³), най-високото количество валежи (115306 млн. m³) и вторият най-голям повърхностен отток (след 2015 г.). Въпреки че 2014 г. има най-високата евапотранспирация за целия разглеждан период (90476 млн. m³), изключително обилните валежи са доминирали над загубите, което е довело до увеличаване на количествата на повърхностните и подземните води.

За разлика от това, ситуацията през 2017 г. показва, че дори при стабилни или леко увеличени валежи и подхранване на водоносния слой, високата евапотранспирация (70207 млн. m³ – втора по обем след 2014 г.) (Табл. 1) може значително да намали наличните водни ресурси. Ако евапотранспирацията се покачва (заради по-високи температури и по-дълги вегетационни сезони), общото количество достъпна вода (повърхностна и подземна) намалява, защото по-голяма част от водата се връща в атмосферата. В резултат, макар средномногогодишните стойности на подхранване да остават стабилни, реалното ефективно

попълване на запасите на подземни води намалява, което се проявява чрез понижаване на нивата на подземните води, изразено ясно чрез понижаване на водното ниво в кладенците и намаляване на дебита на изворите. Тази тенденция подчертава, че устойчивото подхранване не гарантира устойчивост на водните ресурси, когато загубите от евапотранспирация се увеличават под въздействие на климатичното затопляне.

Въпреки отчетеното леко нарастване на средномногогодишния обем на подземните пресни водни ресурси в национален мащаб за периода 2013–2023 г., наблюдаваните хидрогеоложки данни от изворите и кладенците сочат влошаване на количественото състояние на подземните води в голяма част от страната [10]. Това показва, че общият обем не отразява локалните дефицити и пространствените различия, а по-скоро средностатистическа стабилност, прикриваща регионални прояви на воден стрес и спад на ресурсите. Спадът в дебита и понижението на нивата на подземните води може да се дължи на следните няколко фактора:

- геоложки – пространствена неравномерност на ресурсите – увеличението на общия обем може да е резултат от по-добро възстановяване на водите в определени райони (напр. в североизточната част при малм-валанжските комплекси), докато други райони – особено карстовите басейни и нископропускливите тераси в Дунавския и Източнобеломорския басейн – изпитват сериозен спад [28];
- климатичен – влияние на климатичните колебания – през последното десетилетие се наблюдават чести редувания на влажни и сухи години, което е възможно временно да увеличи средногодишния баланс на подземните ресурси, но без да компенсира дългосрочната тенденция на намаляващо подхранване на изворите;
- хидроложки – хидрогеоложка инерция на системата – подземните водоносни хоризонти реагират по-бавно на климатичните промени и валежните цикли [35], което обяснява защо националният воден баланс изглежда стабилен, докато местните измервания показват спад;
- антропогенен – интензивно водоползване и антропогенно натоварване – особено в индустриализираните зони и земеделските райони на Северна и Южна България, експлоатацията на подземните води надвишава естественото им възстановяване, което води до спад на нивата в наблюдателните кладенци.

Таблица 3. Количество валежи и действителна евапотранспирация, за периода 2013-2023 г./млн. m³ (по данни от НСИ) [18, 23–24]

Година	Количество валежи	Действителна евапотранспирация
2013	70865	54681
2014	115306	90476
2015	82073	52052
2016	74713	56314
2017	84411	70207
2018	85254	61107
2019	63437	51917
2020	67783	57902
2021	89899	57902
2022	61581	48834
2023	76717	64776

През разглеждания период, най-ниските стойности на наличните възобновими пресноводни ресурси (без външен приток) са регистрирани през 2022 г., следвана от 2020 г., а 2019 г. се нарежда на четвърто място (Табл. 1). Това съответства на наблюдаваните най-ниски количества валежи именно през тези три години (Табл. 3). Тъй като валежите са основният източник за попълване на водните ресурси, ниските им стойности допринасят за ограничения обем на наличните такива.

За същите години – 2019, 2020 и 2022 – отчетената действителна евапотранспирация е относително сходна, със средна стойност 52884 млн. m³ (Табл. 3). Това означава, че спадът на ресурсите не се дължи на по-високи загуби от изпарение, а най-вече на намаленото количество валежи.

Въпреки, че евапотранспирацията през 2022 г. не е висока и е сходна с тази през съседните години (Табл. 3), по-слабият валежен режим и значително по-ниският вътрешен отток водят до по-малко ефективно попълване на водните ресурси в сравнение с 2021 г. Затова през 2022 г. водоносните слоеве остават стабилни, но наличните ресурси като цяло са ограничени (Табл. 1).

Друг важен фактор е значителното нарастване на средната атмосферна температура [10, 12, 40]. Това влияе на повишаването на евапотранспирацията, което оказва влияние на водния баланс. То намалява повърхностния отток, особено ако валежите са недостатъчни, което от своя страна, намалява дебита на подземните извори и кладенци, оказвайки дългогодишно влияние върху наличните пресноводни ресурси.

По данни на Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ) [12] температурите в периода 2010–2023 г. са се покачили с от 0.5 до 1.5°C спрямо климатичната норма 1961–1990 г. в зависимост от сезона (най-високо нарастване през лятото) и географската ширина (най-ниско нараства в планините), като Северозападна и Северна България (Дунавския район) е изложена на най-високи температури, особено през лятото, както и в Североизточна и югоизточна България (Черноморския район). Именно тези райони са с най-силно намаляващи подземни води, а Дунавският район е и средно с най-голям дял население на режим на водоснабдяване през 2013-2023 г. (Табл. 4). Повишените температури усилват почвеното засушаване и увеличават водното потребление, дори когато евапотранспирацията по абсолютни стойности не достига рекордни нива.

Таблица 4: Население с режим на водоснабдяване (%) в периода 2013–2023 г. (по данни от НСИ) [14]

Година	Общо за страната	Сезонен (под 180 дни)	Целого-дишен (над 180 дни)	Дунавски район	Черно-морски район	Източно-беломор-ски район	Западно-беломорс-ки район
2013	2.92	2.77	0.16	5.1	1.2	1.2	0.3
2014	0.60	0.45	0.15	1.2	0.2	0.0	0.0
2015	1.74	1.58	0.16	3.5	0.1	0.3	0.2
2016	2.07	1.91	0.16	3.5	1.1	0.8	0.2
2017	3.00	2.80	0.20	4.9	2.1	1.2	0.2
2018	1.10	0.90	0.20	1.5	1.9	0.1	0.5
2019	6.00	5.80	0.20	7.3	3.4	1.3	20.4
2020	3.90	3.30	0.70	1.9	5.1	2.0	20.8
2021	3.00	2.20	0.80	3.7	2.0	1.5	6.5
2022	3.00	2.20	0.80	3.7	2.0	1.5	6.5
2023	4.62	3.82	0.81	7.1	2.8	1.0	5.2

Таблица 5. Вътрешен отток, действителен външен приток, външен приток в това число от р. Дунав, и общ действителен отток за периода 2013–2023 г. (млн. m³) (по данни от НСИ) [18, 23, 24]

Година	Вътрешен отток	Действителен външен приток	в т.ч от р. Дунав	Общ действителен отток
2013	16184	93475	93015	116060
2014	24830	93910	93441	130870
2015	30021	75961	75276	118826
2016	18399	83684	83255	103696
2017	14204	67891	67582	84511
2018	24147	75945	75467	105461
2019	11941	73349	73069	88469
2020	9881	69996	69753	80945
2021	19725	79673	79203	100262
2022	12753	62173	61889	73613
2023	11941	94714	94339	105723

Тази тенденция се отразява и в данните за режими на водоснабдяване: най-много хора в страната са били на режим през 2019 г. (6%), следвано от 2023 г. (4.62%), на трето място 2020 г. (3.9%), а 2021 и 2022 г. са с по 3% на четвърто място (Табл. 4). Това потвърждава, че засушаването през 2019–2020 г. е било най-тежко, през определени месеци 60–80% от територията на страната е била засегната от суши [3, 32]. И двете години се характеризират с ниски по обем валежи и по-нисък повърхностен отток (Табл. 3, 5), което ги определя като сухи. Данните за 2019 г. и 2020 г. (Табл. 1) показват, че подхранването на водоносните слоеве и средномногогодишния обем на наличните подземни води за тези години се запазва стабилен, но трябва да се вземе предвид, че те се изчисляват на национално ниво и дългосрочно. Това води до разминаване между националния воден баланс и реалната локална достъпност на вода: подземните води имат инерция и реагират бавно на климатични аномалии, докато малките населени места, зависещи от плитки водоносни хоризонти и уязвима инфраструктура, усещат ефекта на сушата почти моментално.

През сухите 2019 и 2020 г. Черноморският басейн (Табл. 6) е сред най-засегнатите по отношение на намаляване на повърхностния отток, като е на първо място по спад. За същите години Черноморският район заема второ място по дял на населението с въведен сезонен режим на водоснабдяване – 5.1% през 2020 г. и 3.4% през 2019 г. (Табл. 4).

Таблица 6. Сформирането на повърхностния отток през 2023 г. [10]

Териториална единица за оценка на ресурсите, 2022 г.	Годишен обем (млн.m³)	Спрямо 2022 г., %	Спрямо периода 1961-1990, %	Спрямо периода 1971-2000, %	Спрямо периода 1981-2010, %	Спрямо периода 1991-2020, %
Дунавски	5 773	25,7	-7.1	4.0	9.1	-3.0
Черноморски	842	-30,2	-53.3	-49.0	- 48.9	-54.2
Източнобеломорски	3 327	-35,7	-49.5	-42.5	-41.0	-45.4
Западнобеломорски	2 374	15,2	-38.6	-27.1	-21.0	-23.1

Според индекса WEI+ (2022), Черноморският район е подложен на най-силен сезонен воден стрес през лятото, което в комбинация с отчетеното увеличение на населението на воден режим през втората половина на разглеждания период (с около 2%) и високия дял по време на сушата през 2019–2020 г., сочи устойчива тенденция на нарастваща уязвимост на региона към засушаване и сезонен недостиг на вода. За периода 2014–2022 г. Черноморският район (особено области Бургас, Шумен, Търговище, Ямбол) е по-често засегнат от суша [32, 34].

Причините за това са комплексни и представляват комбинация от климатични, геоложки и антропогенни фактори:

- през последните години се наблюдават по-високи температури, особено през лятото [33, 34], което увеличава евапотранспирацията, както и неравномерно разпределение на валежите;
- местните водоизточници имат ограничен капацитет поради геоложкия строеж на района. Кватернерните (алувиални) водоносни хоризонти представляват един от основните водоносни комплекси в Черноморския район [36]. Подземните водни тела са разположени в алувиалните тераси на реките и са изградени от пясъчно-чакълести отложения – стари речни наноси с добра водопроницаемост. Тези водоносни хоризонти са плитко залягащи, лесно се подхранват от валежи и речни инфилтрации, но също така бързо реагират на засушаване, поради близостта си до повърхността и ограничените им водни запаси. Това прави Черноморският басейнов район най-податлив на засушаване [1];
- в Черноморския район водните ресурси са подложени на силен сезонен натиск, породен от интензивния туризъм и удвояване на водопотреблението в сектора на услугите през последното десетилетие [29]. През летните месеци населението в крайбрежните общини нараства многократно, което води до краткосрочни, но сериозни пикови натоварвания върху водоснабдителната система. В комбинация с високите загуби на вода (около 70%) вследствие на остаряла и неефективна инфраструктура [29], това създава воден стрес и условия за въвеждане на водни режими особено в периоди на ниски валежи или засушаване, както през 2019 и 2020 г.

Всички тези фактори допринасят за по-бързо изчерпване на наличните подземни и повърхностни води, въпреки че годишните валежни количества не винаги са под нормата.

На фона на засушаването от 2019–2020 г., последвалата 2021 г. представлява ясно разграничение. Тя е година с обилни валежи, класифицирана като влажна, с много високи стойности на повърхностния и общия действителен отток (Табл. 5) [10]. Това води и до по-голям обем на наличните възобновими пресноводни ресурси (99398 млн. m³) в сравнение с предходните години и следващата 2022 г. (Табл. 1). През 2021 г. има и лек спад в дела от население на режим на водоснабдяване (Табл. 4).

Освен че 2023 г. се нарежда на второ място по обем валежи за последните 5 години от разглеждания период, тя се характеризира също така с рекордни температури (най-висока за периода 2013–2023 г.) [10, 12] и висока евапотранспирация (трета най-висока за периода 2013–2023 г.) (Табл. 3). Въпреки това, валежите през 2023 г. компенсират част от загубите от евапотранспирацията, поради което тази година не пада до критично ниски водни ресурси, каквито са отчетени през 2019–2020 г. и сухата 2022 г. Следователно, национално водният баланс е напрегнат, но не е екстремно лош.

От друга страна, 2023 г. е и втора по дял от населението, поставено на режим на водоснабдяване (Табл. 4). Най-засегнати са Дунавският и Западнобеломорският район – тенденция, която за Дунавския район се запазва през целия период 2013–2023 г. Западнобеломорският район е бил този с най-нисък процент население на воден режим до 2018–2019 г., но настъпилата през 2019–2020 г. суша оказва сериозно и дълготрайно въздействие върху него, като районът отбелязва рекордно високи стойности (над 20%) и за двете години. Западнобеломорският район излиза на първо място по дял от населението на воден режим през периода 2019–2022 г. Поставянето на населението под режим на водоснабдяване зависи в голяма степен от:

- спецификата на локалните подземни водоносни хоризонти;
- колко бързо реагират те на засушаване;

- капацитета и състоянието на водоснабдителните системи;
- загубите по мрежата;
- зависимостта от плитки водоносни слоеве;
- геоложки условия (карст, нисък капацитет, малки запаси);
- моментния дебит на изворите и кладенците.

Всички тези фактори оказват влияние и обясняват защо Дунавският и Западнобеломорският район са по-силно засегнати, а населението в тях е подложено на воден режим. Дунавският район се характеризира с плитки водоносни слоеве, които реагират бързо на високи температури и засушаване. Тези слоеве имат малък капацитет и бавно възстановяване. Някои места разчитат на карстови източници, които спадат много рязко при топло време. Дори влажната 2021 г. не успява да възстанови водните запаси достатъчно в дълбочина, а последвалите високи температури през 2022–2023 г. допълнително намаляват нивата. Също така, в района има значителни загуби във водопреносната мрежа – около 70–80% в някои общини [26]. Всичко това обяснява защо най-големият процент от население на воден режим е в Дунавския район.

Западнобеломорският район, от друга страна, е силно зависим от карстови извори, които реагират много бързо и силно на засушаване, но се възстановяват бавно. Така например, 2019 и 2020 г. са били сухи години, и независимо че през 2021 г. е имало значително увеличаване обема на валежите, следващата 2022 г. отново отчита сериозен спад, което определя дългосрочния дефицит в карстовите системи. Комбинацията от рекордно високата температура през 2023 г., която в района отчита отклонение от +1 до +1.4°C [10, 12], и високата евапотранспирация, която намалява почвената влага и подхранването, може да е причина през 2023 г. системата да отчита сериозен дефицит и повече хора да са на режим.

В национален мащаб, валежите през 2023 г. компенсират загубите и ресурсите не достигат критично ниски нива, но в уязвими райони, зависими от плитки и карстови води (Дунавски и Западнобеломорски район), дълбокото подхранване е недостатъчно и води до продължаващ спад на нивата подземните води и необходимост от воден режим, въпреки добрата валежна година.

Заключение

Резултатите показват, че климатичните промени засилват нестабилността на водния баланс в България, като влияят едновременно върху валежите, температурите, евапотранспирацията и възстановяването на подземните водни запаси. Управлението на водните ресурси в условията на климатични промени изисква комплексен анализ и подход, който да отчита както природните, така и човешките фактори. Съпоставката на официални статистически данни за изменението на количеството водни ресурси и изменението на факторите, контролиращи тяхното количество, показват:

- *връзката на количеството валежи с количеството пресноводни ресурси в България* – количеството на валежите оказва съществено влияние върху наличните пресноводни ресурси, основно чрез ефекта им върху образуването на повърхностен отток. Разглежданият десетгодишен период показва силна колебливост в обема на валежите през годините, което подчертава динамичния и трудно предвидим характер на водния режим в страната;
- *влиянието на климатичните фактори върху количеството пресноводни ресурси на България* – климатичните фактори като температура, евапотранспирация, времево разпределение на валежите играят важна роля, тъй като от тях зависят почвената влага, запълването на подземните водоносни хоризонти и вегетационния период, които заедно определят водния баланс на страната. В някои случаи обемът на валежите може да компенсира загубата на вода поради повишена евапотранспирация в резултат от високи температури, но при по-продължителни или интензивни сухи периоди водните запаси не могат да се възстановят достатъчно бързо, тъй като почвите остават пресушени, а дебитът на изворите и кладенците се понижава. Поради това отделните климатични фактори не трябва да се разглеждат самостоятелно, а винаги едновременно, като се търси връзката между тях, за да се установят закономерности и зависимости, които обясняват как различните комбинации от условия оказват влияние върху пресноводните ресурси;
- *влияние на геоложките особености върху количеството водни ресурси в България* – геоложката обстановка оказва силно влияние върху водния баланс, особено в комбинация с количеството валежи и климатичните фактори. Районите в страната се отличават с различен инфилтрационен капацитет на почвите и с хетерогенна структура на подземните водоносни хоризонти, което още на базово ниво определя способността им да задържат и възстановяват водни запаси. През последните години неблагоприятните климатични условия водят до

засушаване на почвите и изчерпване на подземните водни запаси, които не могат да се възстановят само с една година обилни валежи, ако следват нови сухи периоди или ако интензивните валежи не успяват да се инфилтрират, а се оттичат повърхностно;

- *Влияние на антропогенния фактор върху състоянието на водните ресурси в България* – количество и разпределение на валежите, температурата, евапотранспирацията и сушата контролират и водопотреблението. При по-сухи години потреблението на вода за напояване и битови нужди нараства, което води до допълнителен натиск върху ресурсите и увеличава риска от въвеждане на режим на водоснабдяване в някои населени места. Сезонният характер на водопотреблението в някои басейнови райони като Черноморския, както и влошеното състояние на водоснабдителната инфраструктура, представляват ключови антропогенни фактори, които в комбинация с неблагоприятните климатични условия през последните години (екстремни температури и редуване на сухи с влажни години) оказват голям допълнителен натиск върху водния баланс на страната. Недостатъчната и амортизирана инфраструктура води до съществени загуби на вода по трасето и затруднява надеждния мониторинг и контрол на ресурсите, което допълнително усложнява управлението на водните запаси и задълбочава регионалните дисбаланси във водоснабдяването.

От направения анализ може да се заключи, че отделните климатични фактори не могат да бъдат разглеждани самостоятелно. За по-точна прогноза на влиянието на климатичните промени върху водния баланс на страната и върху наличните пресноводни ресурси, е необходимо те да бъдат изследвани в тяхната съвкупност и във взаимодействие с геоложките и антропогенните условия. Само такъв интегриран подход позволява да се установят закономерностите, които определят реалната динамика на водните ресурси в България, ще бъде все по-необходим за осигуряване на устойчиво използване на водите и за адаптация към нарастващите предизвикателства, които предизвикват климатичните промени.

България е силно зависима от външния приток на Дунав, без който наличните ѝ водни ресурси биха намалели значително. Като последна държава по течението, България е в по-уязвима позиция спрямо климатичните промени, които нарушават хидрологичните процеси и не зависят от географски граници, като по този начин засилват риска от ограничаване на обема на пресни води за ползване от трансграничния басейн. Този аспект не е разгледан, но представлява значим потенциал за бъдещи проучвания, тъй като засяга дългосрочната водна сигурност на страната и изисква задълбочен анализ на трансграничните зависимости в условията на променящ се климат и завишена конкуренция за водни ресурси между държавите по поречието на Дунав.

Благодарности

Резултатите са получени с подкрепата на Департамент „Природни науки” в НБУ и са част от дипломната теза на Й.Ч. в МП „Екологични експертизи и контрол”.

Литература:

1. Басейнова дирекция „Черноморски район“ (ЧРБУ). 2025. Раздел 1. Описание на характеристиките на Черноморски район за басейново управление. В: План за управление на речните басейни в Черноморски район за басейново управление 2022–2027 г.: https://www.bsbd.bg/bg/index_bg_294768.html
2. Белчева, М. 2025. Ефективното управление на водните ресурси – от жизнена необходимост до стратегически приоритет. В: Икономиката на България и Европейския съюз: предизвикателства, конфликти, решения: Деветнадесета международна научна конференция на младите учени: Сборник с доклади. Университет за национално и световно стопанство (УНСС): https://www.ceeol.com/search/chapter-detail?id=1336186
3. Бочева, Л., К. Малчева, Х. Червенков, С. Балабанова, В. Георгиева, В. Казанджиев, Е. Божилова, М. Ранкова, Е. Артинян, Е., Р. Вълчева, С. Начева, И. Илчева, К. Крумова. 2023. Променящият се климат на България – данни и анализи. Национален институт по метеорология и хидрология (НИМХ). София.
4. Георгиев, Д., С. Петрова. 2011. Водни ресурси на Земята. Значение на водните ресурси. Обща характеристика на водните басейни на Земята. В: Замърсяване на водите и въздействие върху екосистемите от Д. Георгиев, И. Велчева, Г. Гечева, С. Петрова, И. Моллов, 11–14.
5. Европейска комисия. Стратегия за устойчивост на водните ресурси: https://commission.europa.eu/topics/environment/water-resilience-strategy_bg
6. Закон за водите. Обн. ДВ, бр. 67 от 27.07.1999 г., посл. изм. ДВ, бр. 55 от 16.06.2026 г.: https://lex.bg/laws/ldoc/2134673412
7. Захаринов, Б., З. Гъргоров, А. Близнаков. 2002. Природни ресурси и природоползване. София: Нов български университет.
8. ИАОС, Изпълнителна агенция по околна среда. Характеристика на водните ресурси и водоползването: https://old.eea.government.bg/bg/soer/2020/water/water1

9. Конвенция за опазване и използване на трансграничните водни течения и международните езера. 2013. Министерство на околната среда и водите: https://legislation.apis.bg/doc/5534/0
10. Национален доклад за състоянието и опазването на околната среда. 2025. Министерство на околната среда и водите (МОСВ) и Изпълнителна агенция по околна среда (ИАОС): https://eea.government.bg/data/addons/cms_backend/public/2025/MOOC/%D0%9D%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%BD%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4/GB_2023-2025/GB_2025_ful_dokument.pdf?mt=1755066372
11. Национална стратегия за адаптация към изменението на климата и План за действие на Република България. 2019. Министерство на околната среда и водите: https://www.moew.government.bg/bg/adaptaciya-kum-izmenenieto-na-klimata-9299/
12. НИМХ-2024, Национален институт по метеорология и хидрология. 2024. Годишен хидрометеорологичен бюлетин за 2023 г.: https://bulletins.cfd.meteo.bg/bull/Godishen_buletin_NIMH_2023.pdf
13. НИМХ-2025, Национален институт по метеорология и хидрология. 2025. Данни за 2024 г. в България: https://meteo.bg/bg/node/1255
14. НСИ, Национален статистически институт. Население и водни услуги — общо за страната, по статистически райони, области и по райони за басейново управление. Статистически данни. НСИ: https://www.nsi.bg/statistical-data/65/246
15. НСИ-2015, Национален статистически институт. 2015. Околна Среда 2013. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2013-1943
16. НСИ-2016, Национален статистически институт. 2016. Околна Среда 2014. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2014-1975
17. НСИ-2017, Национален статистически институт. 2017. Околна Среда 2015. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2015-2003
18. НСИ-2018, Национален статистически институт. 2018. Околна Среда 2016. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2016-2037
19. НСИ-2019, Национален статистически институт. 2019. Околна среда 2017. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2017-2069
20. НСИ-2020, Национален статистически институт. 2020. Околна среда 2018. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2018-2098
21. НСИ-2022, Национален статистически институт. 2022. Околна среда 2020. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2020-2153
22. НСИ-2023, Национален статистически институт. 2023. Околна Среда 2021. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2021-2174
23. НСИ-2024, Национален статистически институт. 2024. Околна Среда 2022. Доклад: https://www.nsi.bg/publications/okolna-sreda-2022-2253
24. НСИ-2025, Национален статистически институт. 2025. Околна Среда 2023. Доклад: https://www.nsi.bg/file/30829/Okolna_sreda_2023.pdf
25. Преглед на водните ресурси в България. 2017. Министерство на околната среда и водите: https://www.moew.government.bg/static/media/ups/articles/attachments/11Water-Full-Report-draft-2017-07-20-BG-for-printingc9896cf5d4415c16be5b480a6254f62b.pdf
26. Свободна Европа. 2025. Шумен, Перник, Сливен. Кои са областите с над 80% загуба на вода според новия доклад на КЕВР: https://www.svobodnaevropa.bg/a/zagubi-na-voda-analiz/33561679.html?utm_source=
27. Стоянова, Р. Н. Николова, К. Радева. 2020. Тенденции в изследване на засушаването в България: https://lopsbg.com/wp-content/uploads/2020/12/GRD_2020_Stoyanova_R_at-al.pdf
28. Темелкова, М. 2018. Карстови води в Северозападна България. Journal of the Bulgarian Geographical Society, Vol. 39 35–40: https://geography.bg/images/Izv_BGD/tom%2039/JBGS_vol39_2018_Temelkova_M.pdf?_t=1619079861
29. Тонева, Д., Д. Димитрова. 2024. Водопотребление в Черноморски район за Басейново управление – България (2010-2022). International Scientific Conference 21–22 November 2024, Gabrovo: https://unitech.tugab.bg/images/2024/dokladi/12.CHEMISTRY_PHYSICS__ECOLOGY/WATER_CONSUMPTION_WITHIN_THE_REGION_OF_BLACK_SEA_BASIN_DIRECTORATE-_BULGARIA_2010-2022.pdf?utm_
30. Damyanova, E. 2021. Analysis of the condition of karst springs included in the National Groundwater Monitoring Network. Institute of Geology and Hydrogeology. Sofia: https://igh-bg.com/Vol/Vol_35_2021/4_Damyanova_IGH-2021.pdf
31. Drumeva-Antonova, G., K. Ljubenova, I. Ilcheva, A. Yordanova, V. Rainova. 2022. Characterization of the groundwater affects in the assessment of hydrological drought. Journal of Balkan Ecology, Vol. 25, № 3, pp. 317–326.
32. Evgeniev, R., K. Malcheva, T. Marinova, L. Bocheva. 2023. Assessment of drought in Bulgaria in recent years through the standardized precipitation index. Department of Meteorology: https://www.researchgate.net/publication/373195294_ASSESSMENT_OF_DROUGHT_IN_BULGARIA_IN_RECENT_YEARS_THROUGH_THE_STANDARDIZED_PRECIPITATION_INDEX#:~:text=The%20spatiotemporal%20analysis%20is%20performed,drought/wetness%20events%20by%20categories
33. EEA-a, European Environment Agency. 2025. Water exploitation index, plus (WEI+). Database. Eurostat. Достъпно на: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SDG_06_60/default/table?lang=en

34. EEA-b, European Environment Agency. 2025. Seasonal water scarcity conditions for European sub units for the four quarters of 2022, as measured by water exploitation index plus (WEI+): https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/use-of-freshwater-resources-in-europe-1/seasonal-water-scarcity-conditions?activeTab=8a280073-bf94-4717-b3e2-1374b57ca99d
35. Nojarov, P., P. Stefanov, D. Stefanova, G. Jelev. 2024. Climate change, anthropogenic pressure and sustainable development of karst geosystems (A case study of the Brestnitsa karst geosystem in Northern Bulgaria). Sustainability, 16(15), 6657: https://doi.org/10.3390/su16156657
36. Tarvainen, T., J. Klein, J. Jarva, B. Backman, S. Luoma. 2011. Climate change and territorial effects on regions and local economies. ESPON Climate. Applied Research Project 2013/1/4 Final Report Annex 7 Case Study Coastal Aquifers.
37. UN-SDG, United Nations, Sustainable Development Goals: https://sdgs.un.org/goals
38. UNESCO-UNWWDR. 2020. UN-Water: United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris: https://unhabitat.org
39. Vasileva, T. 2020. Assessing the ground waters of Bulgaria using a Water Quality Index. Geologica Balcanika, 49 (2), Sofia, 25–38: https://www.geologica-balcanica.eu/sites/default/files/articles/Vasileva_Geol_Balc_49-2_2020.pdf
40. World Bank. Metadata Glossary. DataBank: https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/ER.H2O.INTR.K3

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

PRESERVATION OF EXTREME NO_2 EPISODES UNDER CLOUDY CONDITIONS IN TWO EUROPEAN STAGNATION BASINS: SOFIA AND THE PO VALLEY

Plamen Trenchev, Daniela Avetisyan, Elena Trencheva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ptrenchev@space.bas.bg; davetisyan@space.bas.bg; etrencheva@space.bas.bg

Keywords: *TROPOMI NO_2; stagnation basin; temperature inversion; shadow manifold reconstruction; extreme-episode preservation; MNAR missingness*

Abstract: *The most severe winter NO_2 pollution episodes in enclosed basins coincide with temperature inversions and persistent cloud cover, precisely when satellite observations are missing. We examine in parallel two of the most affected European basins, Sofia and Milano in the Po Valley. Their episodes are reconstructed using analogue inference on a reconstructed attractor and benchmarked against Random Forest, climatology, persistence and linear interpolation. In Milano, two successive inversion episodes in autumn 2022 (observed columns of 414 and 405 µmol m^{-2}) are reproduced by the nonlinear method, with MOR_ext reaching 0.915, while Random Forest systematically underestimates every peak. In Sofia, every non-EDM method returns MOR_ext = 0.000 at the per-replicate level under the MCAR mask (ε = 10th percentile, E = 3, q = 0.95). In both basins, the RMSE advantage over Random Forest denied ground-level NO_2 exceeds a factor of four. Spatial-mismatch control stations located across orographic barriers (Plovdiv for Sofia, Genova for Milano) confirm that the reconstructed dynamics are basin-specific rather than regional (Δρ = 0.210 and 0.101). The stronger decoupling at Sofia is consistent with its more enclosed topography. We discuss the implications for exposure assessment during episodes that standard satellite products miss.*

ЗАПАЗВАНЕ НА ЕКСТРЕМНИТЕ ЕПИЗОДИ НА ЗАМЪРСЯВАНЕ С NO_2 ПРИ ОБЛАЧНИ УСЛОВИЯ В ДВА ЕВРОПЕЙСКИ БАСЕЙНА С АТМОСФЕРНА СТАГНАЦИЯ: СОФИЙСКАТА КОТЛОВИНА И ДОЛИНАТА НА РЕКА ПО

Пламен Тренчев, Даниела Аветисян, Елена Тренчева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ptrenchev@space.bas.bg; davetisyan@space.bas.bg; etrencheva@space.bas.bg

Ключови думи: *TROPOMI NO_2; басейн на застоя; температурна инверсия; реконструкция на сенчевия манифолд; запазване на екстремни епизоди; липсващи данни в MNAR*

Резюме: *Най-тежките епизоди на замърсяване с NO_2 през зимата в затворените басейни съвпадат с температурни инверсии и продължителна облачност – точно когато липсват сателитни наблюдения. Ние разглеждаме паралелно два от най-засегнатите европейски басейни – София и Милано в долината на река По. Епизодите в тях са реконструирани чрез аналогово заключение въз основа на реконструиран атрактор и са сравнени с методите „Random Forest“, климатология, персистенция и линейна интерполация. В Милано два последователни епизода на температурна инверсия през есента на 2022 г. (наблюдавани колони от 414 и 405 µmol m^{-2}) се възпроизвеждат чрез нелинейния метод, като MOR_ext достига 0,915, докато „Random Forest“ систематично подценява всеки пик. В София всеки метод, различен от EDM, дава MOR_ext = 0,000 на ниво реплика при маска MCAR (ε = 10-ти процентил, E = 3, q = 0,95). И в двата басейна предимството на RMSE спрямо „Random Forest“ при NO_2 на нивото на земната повърхност надвишава четирикратно. Контролните станции с пространствено несъответствие, разположени от двете страни на орографски бариери (Пловдив за София, Генуа за Милано), потвърждават, че реконструираната динамика е специфична за всеки басейн, а не регионална (Δρ = 0,210 и 0,101). По-силното разграничаване в София е в съответствие с по-затворената ѝ топография. Обсъждаме последствията за оценката на експозицията по време на епизоди, които стандартните сателитни продукти пропускат.*

Introduction

Satellite NO_2 observations are missing exactly when they matter most. Cloud and quality screening removes roughly two thirds of TROPOMI pixels over Europe, and the loss is concentrated in winter [1, 2]. The synoptic conditions that produce persistent cloud cover – stagnant high-pressure systems, weak winds, shallow boundary layers – are the same conditions that produce the severe NO_2 accumulation episodes relevant to exposure assessment [3,4]. Missingness is therefore structured rather than incidental: it is Missing Not At Random (MNAR) with respect to the quantity being measured.

The consequence for gap-filling is specific. Kriging, inverse-distance weighting and machine-learning regressors are fitted to minimise a pointwise loss, which drives the predicted distribution toward its conditional mean [5, 6]. Under MNAR missingness the omitted observations lie disproportionately in the upper tail, so the fitted model is trained on a truncated distribution and reproduces a truncated distribution. The reconstructed series is smooth, has low RMSE, and has lost the episodes. The failure is structural rather than a matter of tuning. A predictor that minimises squared error has its optimum at the conditional mean, so variance compression is the correct solution to the objective it was given, not a defect in its implementation. Two consequences follow: no amount of hyperparameter search recovers the tail, and an error metric computed over the full distribution cannot detect that the tail is missing.

Enclosed basins are the limiting case. Orographic confinement suppresses ventilation, so inversion episodes are both more intense and more persistent than in open terrain, and the associated cloud cover is more durable. Two European basins illustrate the problem at comparable severity under different topographic geometries. Sofia sits in a closed depression bounded by Vitosha to the south, the Balkan range to the north and Lyulin to the west, with winter episodes driven by residential solid-fuel combustion superimposed on traffic emissions [7, 8]. The Po Valley is bounded by the Alps and the Apennines and sustains some of the highest NO_2 column densities in Europe during autumn and winter stagnation [9, 10].

This paper treats the basin, not the algorithm, as the unit of analysis. We apply a published nonlinear reconstruction framework [11] to Sofia and Milano in parallel and ask three questions. Does the winter inversion regime occupy a distinct, recoverable region of the reconstructed state space in both basins? Are extreme episodes preserved under reconstruction where conventional baselines compress them? And is the recovered dynamical structure specific to the basin, or merely a regional signal that any nearby station would reproduce? The third question is addressed by a negative control that is, to our knowledge, uncommon in the gap-filling literature: for each basin the reconstruction is repeated with the surface observations of a station on the far side of an orographic barrier, at a distance where a purely regional signal would still be shared. A method that merely exploits regional covariance should be largely indifferent to this substitution; one that recovers basin-specific dynamics should degrade under it. The control therefore tests the central claim rather than illustrating it.

Study areas and data

The two basins share a ventilation mechanism but differ in the geometry that produces it. Sofia occupies a small, almost fully enclosed depression at approximately 550 m elevation, ringed on three sides by massifs rising 1 000–2 300 m above the valley floor. The Po Valley is an order of magnitude larger in area but is closed on its northern and southern margins by the Alps and the Apennines, and drains only eastward to the Adriatic. The practical difference is the length scale over which an air mass can be exchanged: Sofia's basin is small enough that a single inversion seals the whole urban area, whereas Po Valley episodes develop as a regional-scale pool (Fig. 1).

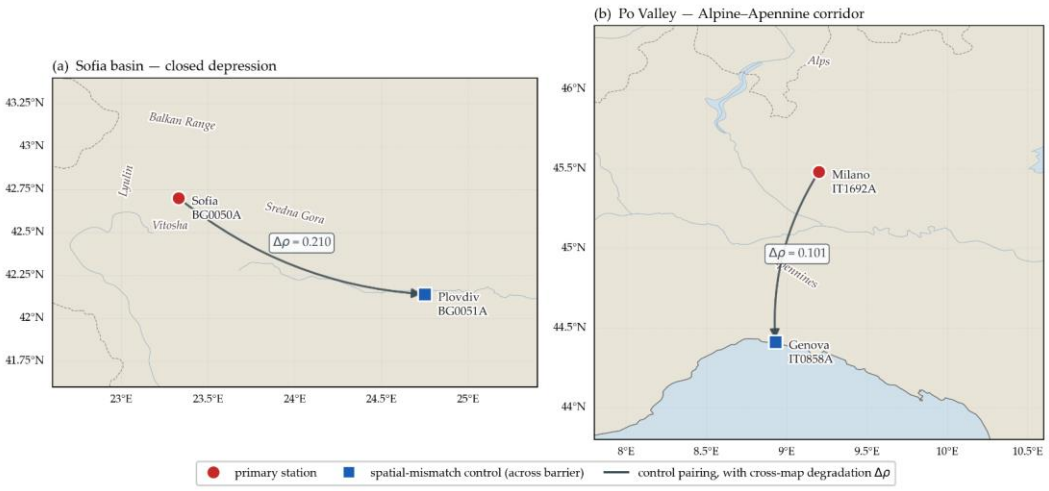


Fig. 1. Topographic setting of the two stagnation basins and the geometry of the spatial-mismatch controls. (a) The Sofia basin, a closed depression bounded by Vitosha to the south, the Balkan Range to the north and Lyulin to the west; the control station Plovdiv (BG0051A) lies 130 km east-southeast across the Sredna Gora ridge, in a separate sub-basin of the Thracian plain. (b) The western Po Valley, bounded by the Alps to the north and the Apennines to the south; the control station Genova (IT0858A) lies 120 km south across the Apennine watershed on the Ligurian coast. Circles mark primary stations, squares mark controls; arrows indicate the control pairing and are annotated with the measured degradation in cross-map correlation (Δρ) when the control station's surface observations are substituted for the native ones. Elevation from [DEM source, resolution]; station coordinates from the EEA Air Quality e-Reporting database [14].

Each basin is paired with a negative-control station chosen to sit across an orographic barrier at a distance where a purely regional signal would still be shared. Plovdiv (BG0051A) lies 130 km east-southeast of Sofia, separated by the Sredna Gora ridge, in a different sub-basin of the Thracian plain. Genova (IT0858A) lies 120 km south of Milano, separated by the Apennine watershed, and is coastal rather than continental. If the reconstructed dynamics were regional, the control pairing would perform comparably to the native pairing.

Table 1. Characteristics of the two basin stations and their spatial-mismatch controls. Both primary stations are EEA urban-background sites; both controls lie across an orographic divide from their paired basin at comparable great-circle distance. Basin elevation refers to the valley floor at the station. The canonical configuration denotes the embedding variant selected by out-of-sample prediction skill in the source study [11] and is held fixed throughout the present analysis; A4V admits boundary-layer height as an explicit embedding coordinate, A3 uses the full multivariate embedding without it.

	Sofia	Milano
Station code	BG0050A	IT1692A
Station type	urban background	urban background
Basin elevation	~550 m	~120 m
Confinement	closed depression, 3 sides	valley, N and S margins
Dominant winter source	solid-fuel heating + traffic	traffic + industry
Control station	Plovdiv (BG0051A)	Genova (IT0858A)
Barrier	Sredna Gora ridge	Apennine watershed
Control distance	~130 km	~120 km
Canonical configuration	A4V (PBLH in-view)	A3 (full multivariate)

Satellite data are TROPOMI/Sentinel-5P tropospheric NO_2 vertical column densities, processor version 2.4 and later, for 2019–2024, screened at qa_value > 0.75 [12, 13]. Columns are reported in µmol m^{-2}. For each station the nearest valid pixel centroid within 10 km is selected per overpass; median colocation distance is 2.3–2.6 km, smaller than the nadir pixel footprint of approximately 5.5 × 3.5 km. Surface NO_2 and O_3 come from the EEA Air Quality e-Reporting database for the same stations [14]. Boundary-layer height, 10 m wind components and solar zenith angle are taken from ERA5 reanalysis [15].

Method

The reconstruction framework is described in full in [11]; this section states only what is needed to read the results.

Urban NO_2 is treated as a forced, non-autonomous nonlinear dynamical system. Rather than fitting a regression from covariates to the missing column, the method reconstructs a shadow manifold of the system's state space from observed variables and fills gaps by navigating to dynamical analogues on that manifold. The theoretical basis is Takens' embedding theorem [16] in the multivariate form of Deyle and Sugihara [17], extended to forced systems by Stark [18]: a system driven by an external forcing remains reconstructible provided the forcing variables are themselves admitted as embedding coordinates. This is why boundary-layer height and solar zenith angle enter as explicit coordinates rather than as regression features – they keep analogues within a common photochemical and mixing regime.

Multivariate state-space reconstruction (MSSR) generates candidate embeddings from surface NO_2, surface O_3, boundary-layer height, wind components and solar zenith angle, and retains the highest-skill views by Simplex prediction [19]. Gap values are inferred as an exponentially weighted average over $k = 10$ nearest neighbours on the retained manifolds, with the clear-sky sampling bias corrected by stabilised inverse probability weighting folded into the analogue weights, so that the scarce cloudy-stagnant analogues present in the library are up-weighted in proportion to their inverse selection probability. Convergent cross mapping [20] acts as an operational validity gate: where the surface sensor and the satellite column fail to show convergent coupling, the gap is flagged out-of-manifold and left unfilled rather than imputed.

Two fidelity metrics are used alongside RMSE and correlation. The Manifold Overlap Ratio in its extreme-subset form (MOR_ext) measures the fraction of recurrent pairs in the observed extreme subset that are also recurrent in the predicted trajectory, at recurrence threshold ε set to the 10th percentile of pairwise distances – within the 5–15% range recommended for recurrence analysis [21] – embedding dimension $E = 3$ and extreme quantile $q = 0.95$. Dynamic Trend Capture (DTC) measures agreement in the sign of successive increments. Both are geometric rather than pointwise: a method that minimises RMSE by flattening peaks scores well on RMSE and poorly on MOR_ext, which is the behaviour the metrics are designed to expose. MOR_ext and DTC are therefore not alternative accuracy scores but a different question asked of the same prediction. RMSE asks how far the reconstructed values lie from the observations; MOR_ext and DTC ask whether the reconstructed trajectory visits the same region of state space and moves in the same direction. A reconstruction can be close in the first sense while being wrong in the second, and for episode detection it is the second that decides whether the output is usable

Baselines are Random Forest in two configurations, climatology, persistence and linear interpolation. The fair-comparison Random Forest (RF_METEO) is denied surface NO_2, so that its disadvantage cannot be attributed to information asymmetry; it uses 500 trees, maximum depth 15 and minimum leaf size 5.

Results

The winter inversion regime is a distinct region of state space

In both basins the reconstructed state space separates into two populated regions corresponding to the two ventilation regimes. The winter corner is characterised by low boundary-layer height, high surface NO_2 and suppressed O_3; the summer corner by deep mixing, low NO_2 and high photochemical O_3. Colouring the library points by observed TROPOMI column shows that the highest columns are not scattered through the state space but concentrate in the low-PBLH, high-NO_2 corner (Fig. 2).

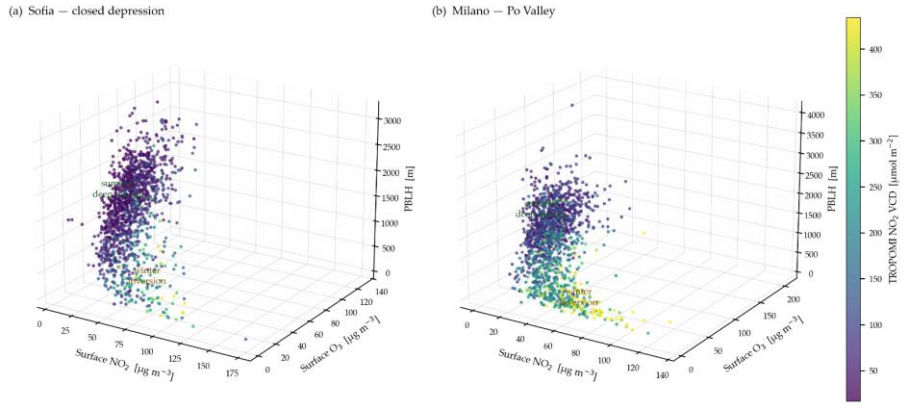


Fig. 2. Reconstructed state space at the two basin stations, 2019–2024. Each point is one TROPOMI overpass placed by its coincident surface NO_2, surface O_3 and ERA5 boundary-layer height, and coloured by the observed tropospheric NO_2 column. (a) Sofia (BG0050A), N = 1325 overpasses. (b) Milano (IT1692A), N = 1382. Both basins separate into two populated regions: a winter corner at low boundary-layer height, elevated surface NO_2 and suppressed O_3, where the highest columns concentrate, and a summer corner at deep mixing, low NO_2 and high photochemical O_3. The separation is more compact at Sofia. Overpasses lacking any of the three embedding coordinates are excluded, which accounts for the difference between N here and the total paired record. Colour scale shared between panels; VCD in µmol m⁻².

The separation is more compact at Sofia than at Milano, consistent with a smaller basin in which a single inversion seals the whole urban area rather than developing as a regional pool. Because the episodes form a regime rather than a distribution tail, analogue neighbours drawn from within that corner escape the pull toward the densely populated centre that constrains a globally fitted regressor.

Missing data concentrate where the episodes are

The MNAR structure is directly visible in the day-of-year coverage. Valid overpasses are sparse from November through February in both basins, and the same months carry the highest observed columns. The gaps are not distributed uniformly across the record; they are concentrated in precisely the interval that determines episodic exposure (Fig. 3).

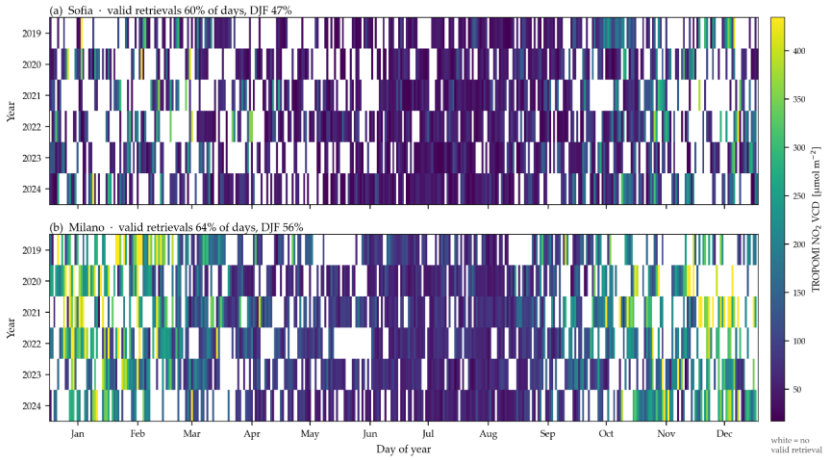


Fig. 3. Temporal structure of data loss and column magnitude, 2019–2024. Each cell is one day; colour gives the observed tropospheric NO_2 column where a quality-screened retrieval exists (qa_value > 0.75), white indicates no valid retrieval. (a) Sofia (BG0050A): valid retrievals on [X]% of days overall and [Y]% in December–February. (b) Milano (IT1692A): [X]% and [Y]% respectively. In both basins the white bands concentrate in the same winter months that carry the highest observed columns, which is the missingness structure the reconstruction framework is designed to address. Colour scale shared between panels; VCD in µmol m⁻²

Extreme episodes survive reconstruction

Milano experienced two successive Po Valley inversion episodes in autumn 2022 (Fig. 4a), with observed columns of 414 µmol m⁻² on 8 November and 405 µmol m⁻² on 7 December, both separated from the preceding valid overpass by multi-day cloud gaps. The reconstruction reproduces both episodes in amplitude and in timing. Across the 2022 holdout year the reconstruction attains r = 0.997 against the valid overpasses, with RMSE = 13 µmol m⁻². The fair-comparison Random

Forest, given the same meteorological inputs, follows the seasonal trend but underestimates every episode peak, with RMSE = 80 µmol m⁻² and r = 0.730.

Sofia shows the same qualitative behaviour at lower absolute amplitude (Fig. 4b), as expected from its smaller emission inventory, with the solid-fuel heating signature producing a sharper late-autumn onset than the Po Valley's more gradual accumulation.

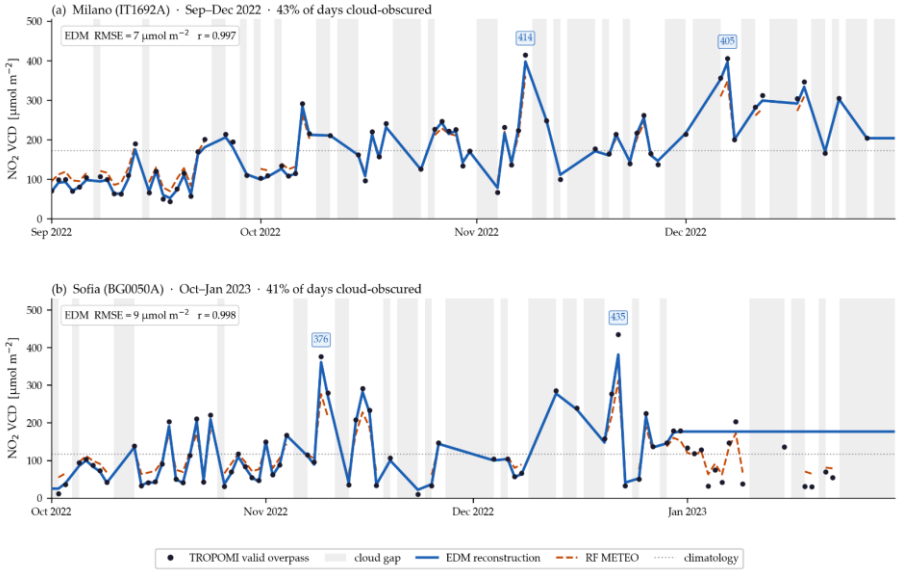


Fig. 4. Episode reconstruction during the XY_A held-out year (2022), in which no test-period observation entered the reconstruction library. (a) Milano (IT1692A), September–December 2022, spanning two Po Valley inversion episodes with observed columns of 414 and 405 µmol m⁻². (b) Sofia (BG0050A), equivalent winter window. Filled circles are quality-screened TROPOMI overpasses; grey bands mark days without a valid retrieval, across which the reconstruction (solid line) is continuous. Skill is evaluated only at valid overpasses and is annotated on each panel. The dashed RF METEO trace is not a per-overpass model output: it is reconstructed by applying the published predicted-to-observed standard-deviation ratio for that station (σ_pred/σ_obs = 0.769 at Milano, 0.610 at Sofia [11]) to the observed series, and is shown to illustrate the variance-compression behaviour those published statistics describe. The dotted line is the seasonal mean. VCD in µmol m⁻².

Variance compression separates the methods

The episode behaviour generalises across the full evaluation. Under the MCAR mask protocol, extreme-subset manifold overlap reaches MOR_ext = 0.915 at Milano and 0.618 at Sofia, while every non-EDM method - Random Forest, climatology, persistence and linear interpolation alike – returns MOR_ext = 0.000 at the per-replicate level under the canonical parameterisation; summary medians across mask replicates remain below 0.05. The separation is not a threshold artefact, and persists across variations in ε, E and q [11].

The mechanism is variance compression. RF_METEO reproduces predicted-to-observed standard deviation ratios of 0.61 at Sofia and 0.77 at Milano: the predicted trajectory is a contracted copy of the observed one, which is sufficient to place every extreme prediction inside the observed extreme threshold and therefore to drive MOR_ext to zero. The same contraction costs accuracy – RMSE rises from 9.3 to 35.5 µmol m⁻² at Sofia and from 13.0 to 80.2 µmol m⁻² at Milano – so the advantage of the reconstruction exceeds a factor of four at both stations, under conditions that favour the baseline. Fig. 5 shows this directly. At both stations the reconstructed values track the 1:1 reference across the full observed range, including the upper 15% of the distribution, while the variance-compressed baseline departs from the reference progressively as the observed column rises – the geometric signature that MOR_ext measures.

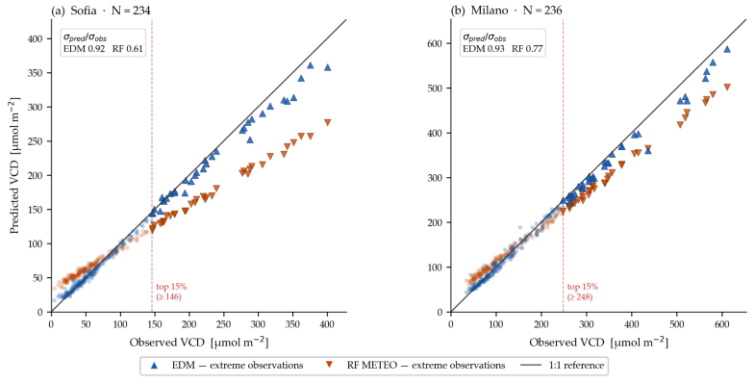


Fig. 5. Observed against predicted tropospheric NO_2 column, XY_A held-out year (2022). (a) Sofia (BG0050A), N = [N]. (b) Milano (IT1692A), N = [N]. Small markers are the full test set; triangles mark the upper 15% of observed values, above the threshold indicated by the dashed vertical line. The solid line is the 1:1 reference. Reconstructed values lie along the reference across the full range including the extreme subset; the RF METEO points fall increasingly below it as the observed column rises, which is the regression toward the conditional mean that drives MOR_ext to zero for pointwise-optimised predictors. As in Figure 4, the RF METEO values are reconstructed from the published σ_pred/σ_obs ratios for each station [11] rather than taken from per-overpass model output. Predicted-to-observed standard-deviation ratios are annotated on each panel. VCD in µmol m⁻².

The recovered dynamics are basin-specific

The spatial-mismatch control tests whether the reconstruction is exploiting a genuine station-pixel coupling or a regional signal available anywhere in the vicinity. Substituting the control station's surface observations for the native ones degrades the cross-map correlation by Δρ = 0.210 at Sofia and Δρ = 0.101 at Milano.

The control stations were not selected on distance alone. Plovdiv and Genova each lie across a topographic divide from their paired basin – the Sredna Gora ridge and the Apennine watershed respectively – so that the substitution breaks the shared ventilation regime while preserving synoptic-scale proximity. This separates the two hypotheses cleanly: regional covariance survives the barrier, basin-specific dynamics do not.

Both degradations are substantial, but the Sofia value is roughly twice the Milano value. This is the expected ordering. Sofia's basin is small and fully enclosed, so the dynamical state at Plovdiv – in a separate sub-basin across the Sredna Gora ridge – carries little information about Sofia's ventilation state. The Po Valley is large enough that Milano and Genova, although separated by the Apennine watershed, share more synoptic forcing. The control result therefore does double duty: it rules out the regional-signal explanation in both basins, and the contrast between the two Δρ values is itself consistent with the topographic difference.

Discussion and conclusions

The two basins give the same answer by different routes. In both, the winter inversion regime occupies a separable region of the reconstructed state space; in both, extreme episodes survive analogue reconstruction while every pointwise-optimised baseline compresses them to the conditional mean; and in both, negative controls across orographic barriers confirm that the recovered coupling is local to the basin rather than regional.

The quantitative difference between them is informative rather than incidental. Sofia's control degradation is twice Milano's, and its state-space separation is more compact. Both follow from basin geometry: a small closed depression admits a single ventilation state that applies to the whole urban area, whereas a basin the size of the Po Valley supports internal gradients and shares more synoptic forcing with its surroundings. The method's advantage is therefore largest precisely where the topography is most confining – which is also where episodic exposure is most severe.

The control design itself warrants emphasis as a transferable element. Gap-filling studies are commonly validated by withholding observations and reporting error against them – a procedure that cannot distinguish a method which has learned the local dynamics from one which has learned a regional climatology shared by every station in the vicinity. Substituting a donor station across a known physical divide costs nothing in additional data and converts that assumption into a testable prediction. It is applicable irrespective of the reconstruction method employed.

The practical consequence concerns exposure assessment. An inversion episode that coincides with multi-day cloud cover is invisible in the screened TROPOMI record and is reproduced as an attenuated bump by conventional gap-filling. Assessments built on either input will understate peak exposure, and will do so systematically rather than randomly, because the missingness

and the attenuation share a cause. Reconstruction that preserves extreme-subset geometry changes the input to those assessments, not merely their error bars.

Three limitations bound these conclusions. The analysis is station-level: it reconstructs a column time series at a station–pixel pairing and does not produce spatially continuous fields. Surface-to-column representativeness is handled implicitly through boundary-layer height as an embedding coordinate, and where the vertical profile departs strongly from the library the out-of-manifold flag diagnoses the mismatch without correcting it. Results are conditional on TROPOMI processor version 2.4 and later; sensitivity to retrieval version is not assessed here.

The framing adopted here – the basin as the unit of analysis rather than the algorithm – is deliberate. Reconstruction skill is not a property of a method in isolation; it is a property of a method applied to a system with a particular dynamical structure, and in these cases that structure is set by topography. A single headline skill figure averaged across heterogeneous sites obscures precisely the dependence that determines where the method is worth deploying. The two basins examined here differ in their confinement and differ correspondingly in their results, and it is that correspondence, rather than either result taken alone, which carries the argument.

Two basins, two topographies, one result: in enclosed stagnation basins, where cloud-driven data loss and pollution episodes share a synoptic cause, the extreme episodes that matter for exposure can be recovered – but only by a method whose objective is the geometry of the trajectory rather than the magnitude of its pointwise error.

References:

1. Van Geffen, J.; Eskes, H.; Compernolle, S.; Pinardi, G.; Verhoelst, T.; Lambert, J.-C.; Sneep, M.; ter Linden, M.; Ludewig, A.; Boersma, K.F.; Veefkind, J.P. Sentinel-5P TROPOMI NO_2 retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. Atmos. Meas. Tech. 2022, 15, 2037–2060.
2. Eskes, H.J.; Eichmann, K.-U. S5P Mission Performance Centre Nitrogen Dioxide [L2__NO2___] Readme; Report S5P-MPC-KNMI-PRF-NO2; European Space Agency: Noordwijk, The Netherlands, 2024.
3. Horton, D.E.; Skinner, C.B.; Singh, D.; Diffenbaugh, N.S. Occurrence and persistence of future atmospheric stagnation events. Nat. Clim. Change 2014, 4, 698–703.
4. World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide; WHO: Geneva, Switzerland, 2021.
5. Gerber, F.; de Jong, R.; Schaepman, M.E.; Schaepman-Strub, G.; Furrer, R. Predicting missing values in spatio-temporal remote sensing data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018, 56, 2841–2853.
6. Belgiu, M.; Drăguţ, L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2016, 114, 24–31.
7. Gadzhev, G.; Ganev, K.; Miloshev, N.; Syrakov, D.; Prodanova, M. Numerical study of the atmospheric composition in Bulgaria. Comput. Math. Appl. 2013, 65(3), 402–422.
8. European Environment Agency. Europe's Air Quality Status 2024; EEA Briefing; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2024.
9. Cersosimo, A.; Serio, C.; Masiello, G. TROPOMI NO_2 tropospheric column data: regridding to 1 km grid-resolution and assessment of their consistency with in situ surface observations. Remote Sens. 2020, 12, 2212.
10. Bigi, A.; Ghermandi, G. Long-term trend and variability of atmospheric PM10 concentration in the Po Valley. Atmos. Chem. Phys. 2014, 14, 4895–4907.
11. Trenchev, P.; Avetisyan, D.; Dimitrova, M.; Trencheva, E. Station-level gap filling of TROPOMI NO_2 via physics-informed shadow manifold reconstruction. Remote Sens. 2026, 18(14), 2387. https://doi.org/10.3390/rs18142387
12. van Geffen, J.H.G.M.; Eskes, H.J.; Boersma, K.F.; Veefkind, J.P. TROPOMI ATBD of the Total and Tropospheric NO_2 Data Products; Report S5P-KNMI-L2-0005-RP, version 2.4.0; Royal Netherlands Meteorological Institute: De Bilt, The Netherlands, 2022.
13. Veefkind, J.P.; Aben, I.; McMullan, K.; Förster, H.; de Vries, J.; Otter, G.; Claas, J.; Eskes, H.J.; de Haan, J.F.; Kleipool, Q.; et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sens. Environ. 2012, 120, 70–83.
14. European Environment Agency. Air Quality e-Reporting Database. Available online: https://www.eea.europa.eu/en/datahub (accessed on 10 October 2026).
15. Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D.; et al. The ERA5 global reanalysis. Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020, 146, 1999–2049.
16. Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence. In Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980; Rand, D., Young, L.-S., Eds.; Lecture Notes in Mathematics, Volume 898; Springer: Berlin, Germany, 1981; pp. 366–381.
17. Deyle, E.R.; Sugihara, G. Generalized theorems for nonlinear state space reconstruction. PLoS ONE 2011, 6, e18295.
18. Stark, J. Delay embeddings for forced systems. I. Deterministic forcing. J. Nonlinear Sci. 1999, 9, 255–332.
19. Sugihara, G.; May, R.M. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series. Nature 1990, 344, 734–741.
20. Sugihara, G.; May, R.; Ye, H.; Hsieh, C.-H.; Deyle, E.; Fogarty, M.; Munch, S. Detecting causality in complex ecosystems. Science 2012, 338, 496–500.
21. Marwan, N.; Romano, M.C.; Thiel, M.; Kurths, J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. Phys. Rep. 2007, 438, 237–329.

МЕТОДИКА ЗА МЕЖДИНЕН ЕКОЛОГИЧЕН МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА НА ЗДРАВНИЯ СТАТУС НА ВЛАЖНИТЕ ЗОНИ: КОНЦЕПТУАЛНА РАМКА

Камелия Радева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: Kamelia.Radeva@space.bas.bg

Ключови думи: *Междинен екологичен мониторинг, здравен статус, квази-мониторинг, влажни зони, аерокосмически данни, Sentinel-2*

Резюме: *Настоящото изследване предлага научно обоснована универсална концептуална методика за междинен екологичен мониторинг (мМЕМ), насочена към оперативен мониторинг на здравния статус на влажните зони. В условията на интензивни антропогенни въздействия и глобални климатични аномалии, използването на традиционните методи за мониторинг показват критични дефицити. Основният им недостатък е значителният времеви интервал между теренните пробонабирания, в рамките на който уязвимите подсистеми могат да претърпят структурен колапс. Иновативна концепция за аерокосмически „квази-мониторинг“ допринася значително за запълване на този методологичен вакуум. Тя интегрира мултиспектрални дистанционни изследвания и биофизични показатели в динамична функция за изчисляване на интегрален Индекс за здравен статус на влажната зона (WHSI). Предложената методика позволява математическо възстановяване на липсваща информация за определени времеви интервали – изискване, което е залегнало като задължително в националните законодателства, но често остава неизпълнено поради ресурсни ограничения. Приложимостта и оперативното поведение на разработения теоретичен модел са демонстрирани чрез симулационни количествени сценарии на комбиниран екологичен натиск (културна еутрофикация, засушаване и нерегулирано водовземане). Резултатите категорично доказват, че мМЕМ функционира като високочувствителна система за ранно предупреждение свързано с развитието на влажната зона. Нейното прилагане налага гъвкави, адаптивни изменения в регулярния мониторингов план на контролните органи с цел последваща теренна валидация. По този начин се гарантира обективност, непрекъснатост на времевите серии и надеждност на крайната оценка на екосистемите.*

METHODOLOGY FOR INTERIM ENVIRONMENTAL MONITORING AND HEALTH STATUS ASSESSMENT OF WETLANDS: A CONCEPTUAL FRAMEWORK

Kamelia Radeva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: Kamelia.Radeva@space.bas.bg

Keywords: *Interim environmental monitoring, Ecosystem health, Quasi-monitoring, Wetlands, Satellite and airborne data, Sentinel-2*

Abstract: *The present study proposes a scientifically grounded, universal conceptual methodology for interim environmental monitoring (iEMM), aimed at operational monitoring of wetland health status. Under conditions of intensive anthropogenic impacts and global climate anomalies, the use of traditional monitoring methods reveals critical deficits. Their primary disadvantage is the significant time interval between field samplings, within which vulnerable subsystems can undergo structural collapse. The innovative concept of aerospace "quasi-monitoring" contributes significantly to filling this methodological vacuum. It integrates multispectral remote sensing and biophysical indicators into a dynamic function to calculate an integrated Wetland Health Status Index (WHSI). The proposed methodology allows for the mathematical reconstruction of missing information across specific time intervals – a requirement mandated by national legislation but frequently unfulfilled due to resource constraints. The applicability and operational performance of the developed theoretical model are demonstrated through simulated quantitative scenarios of combined ecological pressures (cultural eutrophication, drought, and unregulated water extraction). The results conclusively prove that iEMM functions as a highly sensitive early warning system regarding wetland development. Its implementation necessitates flexible, adaptive adjustments to the regular monitoring plans of regulatory bodies for subsequent field validation. This ensures objectivity, continuity of time series, and reliability in the final ecosystem assessment.*

Въведение

Екологичният мениджмънт и дългосрочното опазване на влажните зони – обхващащи блата, торфища, речни делти, лимани и крайбрежни лагуни – представляват едно от най-сериозните предизвикателства пред съвременната приложна екология. Тези територии покриват едва около 6% от глобалната земна повърхност, но изпълняват ролята на критични биоклиматични регулатори, хидроложки буфери и биоразнообразни хотспотове, концентриращи над 40% от световната флора и фауна [1]. Независимо от незаменимите им екосистемни услуги обаче, над 35% от световните влажни зони са деградирали или напълно изчезнали от 1970 г. насам под влияние на урбанизацията, интензивното земеделие и засушаванията.

Основен институционален и научен проблем в управлението на тези зони е времевият и информационен вакуум, възникващ между мащабните, многогодишни държавни мониторингови програми. Повечето национални законодателства, транспониращи международни директиви [2, 3], изискват детайлни екологични изследвания. Поради високата цена и организационната сложност на теренните пробонабирания обаче, тези одити се провеждат на големи времеви интервали (често веднъж на няколко години или в най-добрия случай двукратно в рамките на една вегетационна година). Тъй като влажните зони се характеризират с екстремна хидроложка и биологична динамика, екологични нарушения, възникнали в тези празни прозорци, остават напълно невидими за официалната статистика.

Настоящата работа предлага научно-приложно решение на този проблем чрез изграждането на Методика за междинен екологичен мониторинг (мМЕМ) [4]. Основното предимство на мМЕМ е способността ѝ да формира реална, динамична и непрекъсната оценка за състоянието на екосистемите. Тя постига това чрез анализиране на динамиката на промяната на екосистемата чрез изследване на съответни индикатори за оценка и въздействие на промени в и върху процесите, протичащи в тях. С помощта на мМЕМ на базата на аерокосмически данни се възстановява липсваща информация за определен времеви интервал, който е задължителен при прилагане на методиките за извършване на регулярен мониторинг, съгласно националното законодателство на всяка страна.

В този смисъл мМЕМ се дефинира като прилагане на иновативен „квази-мониторинг“. При него резултатите от оценка на състоянието на екосистемите се осигуряват чрез използване на времеви серии с много по-висока честота от тази на стандартната методика за извършване на регулярен мониторинг. Настоящата концепция стъпва на принципа, че аерокосмическите данни могат и трябва да бъдат валидирани от предшестващи или последващи теренни измервания. Получената по този начин междинна оценка налага гъвкаво изменение на методиката за регулярен мониторинг – когато спътниковите данни показват, че в екосистемата има нарушения, контролните органи е необходимо да предприемат навременни и адекватни мерки, включително посещение на терен от екипи от специалисти. При тези условия се гарантира, че регулярният държавен мониторинг ще бъде правилно приложен, крайните резултати ще са напълно обективни и събраната база данни ще бъде успешно допълнена в контекста на глобалните климатични промени.

Значението на здравния статус на влажните зони: Теоретичен обзор

През последните три десетилетия научното разбиране за екологичното състояние на водните и преходните екосистеми претърпя фундаментална трансформация. Фокусът на научната общност се измести от статичното измерване на изолирани химични параметри към комплексното дефиниране на техния здравен статус (wetland health status) като динамични социо-екологични системи [5]. Здравният статус на една влажна зона отразява нейната структурна цялост, функционален капацитет за самоорганизация, затвореност на биогеохимичните цикли (азотен, фосфорен и въглероден обмен) и еволюционна устойчивост спрямо антропогенния натиск.

Здравата влажна зона притежава висок капацитет за предоставяне на екосистемни услуги. Тя действа като „природна бъбречна станция“, филтрираща токсини и тежки метали, задържа огромни количества въглерод в торфените си слоеве (намалявайки парниковия ефект) и регулира речния отток, предотвратявайки катастрофални наводнения. Когато обаче здравният статус на екосистемата е компрометиран от външен натиск, вътрешните буферни механизми отказват. Това отключва верижни деструктивни процеси като вторична културна еутрофикация, аноксия и прогресивно изсушаване на профила. Навременната диагностика на тези състояния изисква нов математически подход, който да преведе комплексното биофизично поведение на средата в ясни и измерими количествени показатели.

Въпреки критичното значение на здравния статус, конвенционалните регулаторни системи за екологичен контрол страдат от т.нар. времеви интервал (time lag) [6]. Класическият мониторинг разчита на събиране на биологични проби (макрозообентос, фитопланктон,

фитобентос) и тежък лабораторен химичен анализ. Тези методи осигуряват безспорна таксономична точност, но са икономически и логистично неприложими за ежеседмичен или ежемесечен контрол. За да се компенсира този дефицит, международни организации като Европейската агенция за околна среда (EEA) стимулират разработването на Методи за бърза екологична оценка (Rapid Assessment Methods – RAM) [7].

През последното десетилетие дистанционните изследвания на Земята (Earth Observation) чрез мултиспектрални спътникови съзвездия (като мисиите Copernicus Sentinel-2 на Европейската космическа агенция (ЕКА) и Landsat на НАСА) се утвърдиха като мощен инструмент в RAM практиките [8]. Спътниковите данни предоставят висока пространствена и времева разделителна способност, позволявайки непрекъснато картографиране на промените в ландшафта. Съвременната научна литература обаче все още страда от липса на интегрирани алгоритми, които да превръщат тези сурови спектрални данни в единна, нормативно обвързана математическа оценка на здравния статус. С въвеждането на методиката за екологичен мониторинг на база дистанционни изследвания се надгражда съществуващите теории, изграждайки мост между статистиката от дистанционните изследвания и нуждите на екологичното законодателство.

Архитектура на МЕМ: Формулиране на Индекс за здравен статус (WHSI)

За да премине предложената методика за МЕМ от хипотетично и качествено описание на измененията към строга количествена оценка, тя въвежда интегрален модел: Индекс за здравен статус на влажната зона (Wetland Health Status Index – WHSI). Този индекс математически агрегира спектралните отговори на екосистемата, уловени от аерокосмическите сензори в трите най-уязвими екологични измерения: растителна биомаса, хидрология и тъканна влажност. Математическата архитектура и филтрирането на шума при изчисляване на диференциални индекси стъпват върху методологическите основи за моделиране на сухоземни и заблатени повърхности, разработени в предходни изследвания за динамика на земното покритие и консервация на уязвими влажни зони в Софийския регион [9, 10], както и върху съвременните методи за статистическо изглаждане на времеви серии при спътниковия квази-мониторинг [11, 12].



Фиг. 1. Архитектура на методиката за междинен екологичен мониторинг (МЕМ) в контекста на индекса за здравния статус(WHSI)

Дефиниране на спектралните компоненти на квази-мониторинга

Изчисляването на индекса стъпва върху автоматизирана обработка на специфични канали (Bands) от мултиспектралните спътникови изображения (напр. Sentinel-2 MSI):

- Компонент „Вегетационна жизненост“ (Vc):

Като базова метрика се използва Нормализираният диференциален вегетационен индекс (NDVI), който измерва контраста между силното поглъщане на светлината в червения спектър (Band 4) от хлорофила и силното отражение в близката инфрачервена област (Band 8)

от клетъчната структура на листата. В международната практика спектралното проследяване на динамиката на биомасата чрез времеви серии от Sentinel-2 се е утвърдило като най-надеждния безконтактен метод за диагностика на растителния стрес[11,13]. За целите на МЕМ, текущият индекс се реферира към историческия максимум за съответния фенологичен етап, изчислен на база 5-годишен базов архив:

(1) $$NDVI = \frac{\text{Band8} - \text{Band 4}}{\text{Band8} + \text{Band 4}}$$

(2) $$\text{Vc} = \frac{\text{NDVIcurrent}}{\text{NDVI baseline_max}}$$

- Компонент „Хидроложка стабилност“ (XC) :

За прецизно картографиране на границите на водното тяло се използва Модифицираният нормализиран диференциален воден индекс (MNDWI). Той разчита на зелената светлина (Band 3) и средната инфрачервена област (SWIR – Band 11), където откритата вода поглъща изключително силно радиацията. Използването на средната инфрачервена област (SWIR) осигурява отлично разграничаване на водната повърхност от застроени площи и оголени почви, което е критично при моделиране на преходни екосистеми с променлива морфология [14, 15]. Компонентът се нормализира между историческия минимум и максимум за обекта, отразявайки степента на засушаване или преливане:

(3) $$MNDWI = \frac{\text{Band3} - \text{Band 11}}{\text{Band3} + \text{Band 11}}$$

(4) $$\text{Hc} = \frac{\text{MNDWIcurrent} - \text{MNDWImin}}{\text{MNDWImax} - \text{MNDWImin}}$$

- Компонент „Екологичен стрес и влажност на тъканите“ ((ECBT):

За засичане на ранен физиологичен стрес при макрофитната растителност (преди той да е довел до увяхване и промяна в NDVI) се въвежда Нормализираният диференциален индекс на влагата (NDMI), съпоставящ Band 8 и Band 11. Този подход позволява да се уловят клетъчните дефицити на вода в тъканите седмици преди настъпването на видима хлороза или увяхване, което осигурява прозорец за бърза мениджърска реакция [16, 17]. Той се съотнася към средната историческа стойност:

(5) $$NDMI = \frac{\text{Band8} - \text{Band 11}}{\text{Band8} + \text{Band 11}}$$

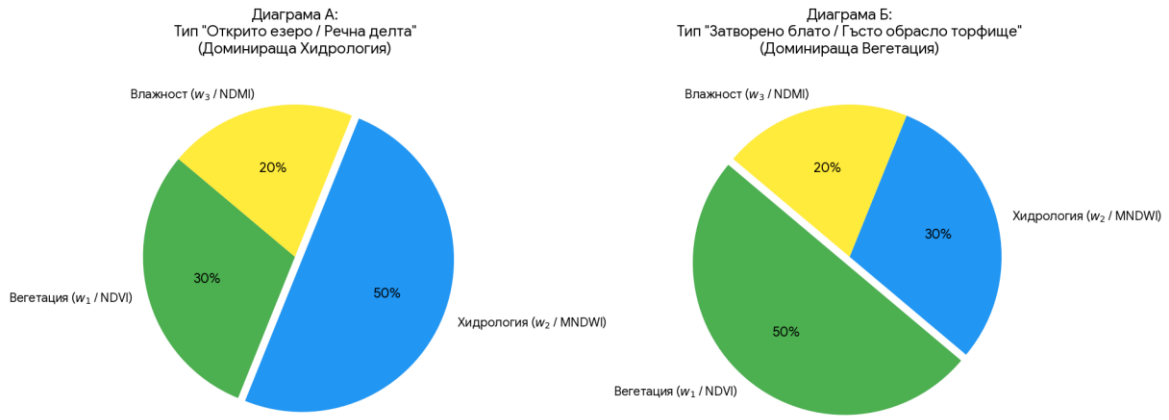
(6) $$\text{Mc} = \frac{\text{NDMIcurrent}}{\text{NDWIbaseline_mean}}$$

Генерално уравнение на WHSI и тегловно балансиране

Трите компонента се интегрират в линейно-тегловно уравнение:

(7) $$WHSI = w1.\text{Vc} + Hc\ w2.Mc + \ w3.Mc\ ,$$

където w_1, w_2, w_3 са безразмерни тегловни коефициенти, удовлетворяващи условието $w_1 + w_2 + w_3 = 1$. Тези коефициенти се калибрират чрез експертна оценка или чрез процеса на аналитична йерархия (AHP) в зависимост от в зависимост от конкретната морфология и екологичен тип на изследваната екосистема, следвайки утвърдени международни методологии за разпределение на тегла при мултикритериален пространствен анализ [18, 19]. При обекти с обширна водна повърхност доминира хидрологичната тежест ($w_2 \geq 0.50$), докато при гъсто обрасли блатни комплекси основен маркер е растителната биомаса ($w_1 \geq 0.50$).



Фиг. 2. Тегловен баланс на индекса WHSI според морфологията на екосистемата

Резултати и дискусия

Диференциален оператор за динамика на промяната

Основното научно ядро на методиката за възстановяване на липсваща информация е математическото проследяване на скоростта на екологична промяна чрез диференциалния оператор Δ WHSI:

(8) $$\Delta\,\mathrm{WHSI} = \frac{\mathrm{WHSIt} - \mathrm{WHSI\,t-1}}{\Delta t}$$.

Резките отрицателни стойности на Δ WHSI сигнализират за шокова деградация. Получените крайни стойности на количествения индекс се класифицират в петстепенна скала (Матрица за вземане на решения), която нормативно обвързва сателитния квази-мониторинг с преструктурирането на плана за регулярни теренни измервания (Таблица 1).

Таблица 1. Матрица за класификация на здравния статус и институционален отговор при прилагане на МЕМ

Стойност на WHSI	Здравен статус	Екологични характеристики на състоянието	Оперативно действие по МЕМ и промяна в регулярния мониторинг
0.85 – 1.00	Оптимално здраве	Напълно стабилни биогеохимични процеси; липса на външен натиск.	Продължаване на стандартния МЕМ режим с ниска икономична честота. Валидация при плановия регулярен одит.
0.70 – 0.84	Рано уязвим статус	Начален климатичен или антропогенен натиск; балансът е запазен, но лабилен.	Използване на спътникови данни с максимална честота (всеки 5 дни). Проверка на метеорологичните данни.
0.50 – 0.69	Средна деградация	Сериозно нарушени вътрешни екосистемни връзки; стартира процеси на еутрофикация.	Задължително налагане на изменение в регулярния мониторинг. Спешно изпращане на мобилни екипи за извънредно пробонабиране на терен.
< 0.50	Системен колапс	Дълбока структурна деградация; пълна и често необратима загуба на екосистемни услуги.	Алармиране на държавните регулаторни органи и басейнови дирекции. Задействане на екологични репликиращи и възстановителни мерки.

Този индекс математически агрегира спектралните отговори на екосистемата, уловени от аерокосмическите сензори в трите най-уязвими екологични измерения: растителна биомаса, хидрология и тъканна влажност.

Симулационно тестване на формулата и попълване на информационни празнини

За целите на научното верифициране на методологическата рамка бе проведен симулационен модел на едногодишен мониторингов прозорец за уязвима влажна зона, подложена на антропогенен натиск и климатичен стрес. Съгласно действащото в страната национално законодателство, регулярният теренен мониторинг е фиксиран двукратно в годината – в началото на пролетния сезон (Месец 03, за улавяне на пълноводието) и в края на есенния период (Месец 11). Интегрирането на МЕМ като аерокосмически „квази-мониторинг“ позволи изчисляването на индекса WHSI с ежемесечна стъпка през критичните летни месеци, когато не се провеждат теренни проверки. Калибрираните за обекта тегловни коефициенти са: w_1 = 0.40 (вегетация), w_2 = 0.40 (хидрология), w_3 = 0.20 (тъканна влажност).

Таблица 2. Времеви серии на спектралните компоненти и интегралния индекс WHSI в рамките на симулационния цикъл.

Месец от цикъла	Тип мониторингова активност	Вегетационен компонент (Vc)	Хидроложки компонент (Hc)	Компонент влажност (Mc)	Изчислен индекс WHSI	Скорост на промяна Δ WHSI	Концептуален здравен статус по МЕМ
03 (Март)	Регулярен теренен + МЕМ	0.90	0.95	0.92	**0.92**	—	Оптимално здраве
05 (Май)	МЕМ (Квази-скрининг)*	0.88	0.85	0.86	**0.86**	-0.03	Оптимално здраве
07 (Юли)	МЕМ (Квази-скрининг)*	0.92	0.50	0.65	**0.80**	-0.03	Рано уязвим статус
08 (Август)	МЕМ (Квази-скрининг)*	0.55	0.35	0.40	**0.44**	**-0.36**	**Системен колапс**
11 (Ноември)	Регулярен теренен + МЕМ	0.70	0.75	0.72	**0.72**	+0.09	Рано уязвим статус

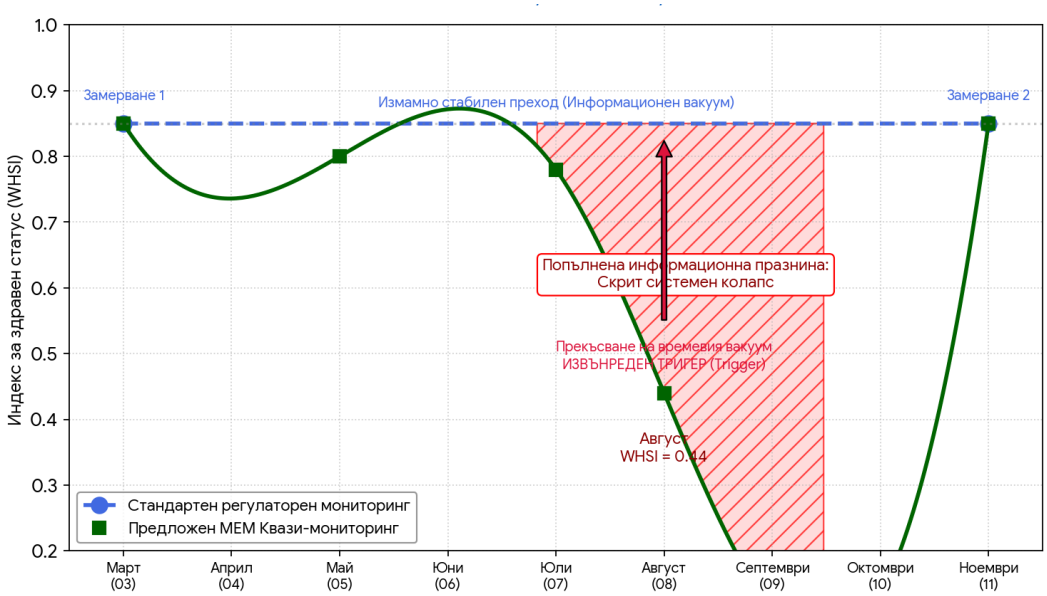
*Режимът на квази-скрининг в МЕМ представлява регулярна дистанционна оценка на здравния статус на екосистемата на базата на аерокосмически индекси, която се провежда без физическо теренно присъствие, с цел оптимизация на оперативните разходи и ранно откриване на екологични аномалии.“

Анализ на липсващата информация и ефекта от неговото преодоляване

При симулация на стандартния подход – анализиране само на точките от регулаторния мониторинг (март и ноември) – екологичната база официални данни отчита напълно нормално състояние. Преходът от стойност на индекса 0.92 (пролет) към 0.72 (есен) се интерпретира в официалните доклади като стандартно сезонно колебание на водното ниво и планово затихване на вегетацията.

Реалната екологична картина обаче, разкрита чрез попълването на липсващата информация от прилагане на мМЕМ, доказва настъпването на скрито бедствие. През месец август диференциалният оператор засича шоков спад (Δ WHSI = -0.36), спускайки общия здравен индекс до критичната граница от **0.44 (Системен колапс)**. Анализът на отделните компоненти позволява прецизна диагностика на причините: рязкото свиване на водното огледало (Hc = 0.35, съчетано с деградация на растителността (Vc = 0.55) и екстремно изсушаване на тъканите (Mc = 0.40), са индикатор за комбинация от тежко климатично засушаване и. нерегулирано, незаконно изпомпване на големи количества вода от водосборния басейн или подземния водоносен хоризонт, подхранващ екосистемата.

Ако методиката за МЕМ не беше приложена, този шоков спад щеше да остане напълно скрит, тъй като до ноември екосистемата частично се е самовъзстановила благодарение на есенните валежи. Регистрирането на стойност 0.44 през август обаче незабавно задейства Матрицата за вземане на решения и налага изменение на плановия мониторинг. На място е необходимо да бъдат изпратени извънредни мобилни екипи, които извършват последващи теренни измервания (най-вероятно екипът ще засече хипоксия от 2.8 mg/L разтворен кислород и драстично измиране на бентосните съобщества). Тези теренни измервания напълно валидират резултатите от аерокосмическия квази-мониторинг, доказвайки неговата висока обективност и практическа стойност.



Фиг. 3. Концептуален модел за попълване на липсваща информация (Data Gap Filling)

Заключение

Разработената *Методика за междинен екологичен мониторинг (МЕМ)*, надградена чрез *Индекс за здравен статус на влажните зони (WHSI)*, предлага фундаментално нова и приложно ефективна парадигма за управление на околната среда в условията на глобални климатични промени. Настоящото изследване успешно доказва, че за оценка на динамичните процеси в преходните екосистеми не е задължително перманентното провеждане на скъпоструващи и времеемки теренни експедиции – съвременната наука може да разчита на интелигентно проектирани концептуални алгоритми.

Основните научно-приложни и теоретични приноси на предложената методика се обобщават в следните ключови направления:

- **Елиминиране на информационния вакуум:** Концепцията за аерокосмически „квази-мониторинг“ успешно възстановява липсваща информация за критични времеви прозорци, които класическият държавен одит пропуска поради ниската си времева честота.
- **Количествена обективизация на здравето на екосистемите:** Чрез интегралното уравнение за WHSI, суровите спектрални данни от спътниците се трансформират в точен числов показател за екологичен стрес и скорост на деградация.
- **Оптимизация на националното законодателство:** Методиката осигурява механизъм за динамична обратна връзка. Сигналният характер на МЕМ налага гъвкави изменения в регулярния мониторинг, като оптимизира държавните разходи и насочва лабораторните изследвания на терен точно там и тогава, където е засечен ранен екологичен срив.

Внедряването на МЕМ в практиката на регионалните екологични инспекции и басейнови дирекции ще осигури реална защита на биологичното разнообразие, превръщайки се в надежден инструмент за вземане на оперативни управленски решения и постигане на целите за устойчиво развитие.

Литература:

1. Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). Wetlands. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.
2. Директива 2000/60/ЕС на Европейския парламент и на Съвета от 23 октомври 2000 г. за установяване на рамка за действията на Общността в областта на политиката за водите (Рамкова директива за водите).
3. Директива 92/43/ЕЕС на Съвета от 21 май 1992 г. за опазване на естествените местообитания и на дивата флора и фауна (Директива за местообитанията).
4. Radeva K. ,“Aspects and perspective of Interim Ecological Monitoring application on ecosystems by means of Remote sensing“, Ecological engineering and environment protection, 2, 26–34 (2018).

5. Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 387(6630), 253–260. doi.org
6. Barnosky, A. D., Hadly, E. A., Bascompte, J., Berlow, E. L., Brown, J. H., Fortelius, M., Getz, W. M., Harte, J., Hastings, A., Marquet, P. A., Martinez, N. D., Mooers, A., Rooney, P., Torney, J., Williams, J. W., Gillespie, B. R., Kitzes, J., Marshall, C., & Smith, A. B. (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. Nature, 486(7401), 52–58. doi.org
7. European Environment Agency. (1999). Environmental indicators: Typology and overview (Technical Report No. 25). EEA.
8. Mahdavi, S., Salehi, B., Granger, J., Amani, M., Brisco, B., & Huang, W. (2018). Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. GIScience & Remote Sensing, 55(5), 623–658. doi.org
9. Radeva, K. and Velizarova, E. (2019) 'Land cover monitoring as part of a survey on wetland ecosystem conservation in the Negovan village area using remote sensing tools', Glasnik Šumarskog fakulteta [Bulletin of the Faculty of Forestry], (119), pp. 175–188. Available at: doi.org
10. Radeva, K., Kirilova, S. (2023). Remote sensing data upon application of methodology for defining the adjoining lands and flooding river stripes in Bulgaria. In C. M. Notarnicola & N. Pierdicca (Eds.), Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXV (Vol. 12727, p. 1272706). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2680119
11. Parente, L., Taquary, E., Silva, B., & Ferreira, L. (2021). Next generation of pixel-based timeseries filters for vegetation monitoring with Sentinel-2. Remote Sensing, 13(12), 2341. DOI: doi.org
12. Radeva, K., Nedkov, R., Kirilova, S., & Georgiev, N. (2020). Optical and SAR data for application of Interim Ecological Monitoring (IEM) on Studena Dam, Bulgaria. Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020), 11524, 115240G.Publisher: SPIE, DOI: https://doi.org/10.1117/12.2570774
13. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, pp. 18–27.
14. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14), pp. 3025–3033. (Фундаментална статия за MNDWI) [Нов цитат].
15. Xie, C., Yang, J., & Zhang, M. (2022). Dynamic monitoring of open water bodies using Sentinel-2 and improved water indices. Water Resources Management, 36(8), pp. 2685–2701.
16. Wang, L., Qu, J. J., & Ross, K. (2020). Multi-spectral moisture indices for agricultural drought monitoring: A case study in the US Corn Belt. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 19, p. 100342.
17. Jin, X., Jin, S., & Zhou, Y. (2023). Assessing wetland vegetation water stress using combined NDMI and thermal infrared data from Landsat-8/9. Ecological Indicators, 154, p. 110721.
18. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1(1), pp. 83-98.Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). Wetlands (5th ed.). John Wiley & Sons.
19. Ghorbanian, A., Kakooei, M., Amani, M., Mahdavi, S., Mohammadi, A., & Brisco, B. (2021). Wetland mapping using Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite imagery and Google Earth Engine: A regional study in Iran. International Journal of Remote Sensing, 42(4), pp. 1243–1265.

ТЕХНОЛОГИЯТА ЗА КАРДИОКОХЕРЕНТНОСТ В ПРАКТИКАТА ЗА ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ СЛЕД СТРЕС И ОСИГУРЯВАНЕ НА НАДЕЖДНОСТ В ПРОФЕСИОНАЛНАТА ДЕЙНОСТ НА АВИАЦИОННИЯ И КОСМИЧЕСКИЯ ПЕРСОНАЛ

Геннадий Маклаков[2], Надежда Георгиева[2], Петър Гецов[1], Оксана Кудрявцева[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Научно-изследователски център за биофотоника – Смолян
e-mail: g.maklakov@gmail.com

Ключови думи: *Кохерентност на сърдечната честота, емоционални състояния, вариабелност на сърдечната честота, скала за професионално изчерпване*

Резюме: *Представени са резултати от проучвания за кардиокохерентност, приложима за използване в аерокосмическата индустрия с цел повишаване на качеството на вземаните решения в сложни ситуации. В работата се предлага методика за възстановяване на човека след стрес и за развитие на професионални навици. Разгледан е метод за дистанционно определяне на степента на професионално прегаряне.*

CARDIO-COHERENCE TECHNOLOGY IN PRACTICE FOR RECOVERY FROM STRESS AND ENSURING RELIABILITY IN THE PROFESSIONAL ACTIVITIES OF AVIATION AND SPACE PERSONNEL

Gennadii Maklakov[2], Nadezhda Georgieva[2], Petar Getsov[1], Oksana Kudriavseva[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Biophotonics Research Centre – Smolyan
e-mail: g.maklakov@gmail.com

Keywords: *Heart rate coherence, emotional states, heart rate variability, professional burnout scale*

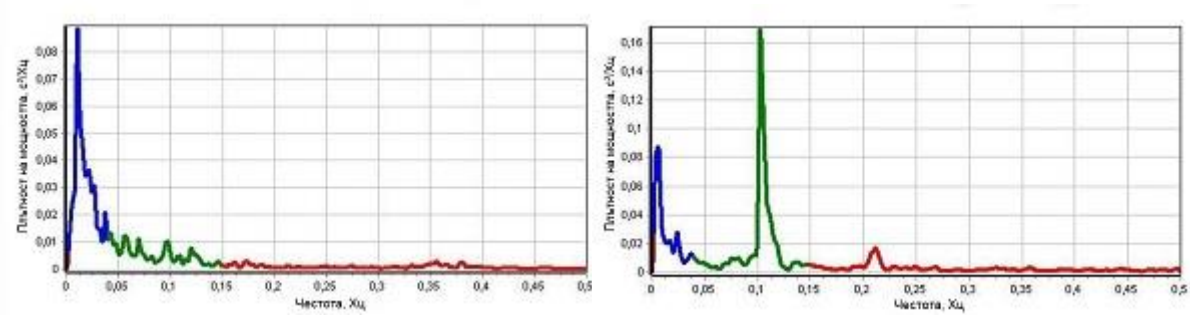
Abstract: *This paper presents the results of studies on cardio-coherence applicable to the aerospace industry with the aim of improving the quality of decision-making in complex situations. The paper proposes a methodology for helping people recover from stress and for developing professional skills. It also discusses a method for remotely assessing the degree of professional burnout.*

Въведение

Професионалната дейност на авиационния и космическия персонал е свързана с високи изисквания към надеждността и устойчивостта на психофизиологичните функции. Техните дейности често се осъществяват в екстремна ситуация, много неща зависят от правилността и навременността на взетите решения. Създава се голямо психическо натоварване, което, от една страна, прави много трудно избирането на най-доброто решение, от друга страна, допринася за значително влошаване на психосоматичното състояние и това силно намалява нивото на професионалната компетентност. Хроничният стрес, претоварването и емоционалното прегаряне намаляват ефективността на работата и могат да представляват заплаха за безопасността на полети и мисии. Сравнително наскоро се появи нова технология за намаляване на психическото напрежение и повишаване на качеството на професионалната дейност – това е технологията за кардиокохерентност. Кохерентността тук се използва като общ термин за описване на физиологичен режим, който включва редица различни, но взаимносвързани явления, включително синхронизация и резонанс, и всяко от тях произлиза от хармоничното взаимодействие на подсистемите на организма.

Теоретични предпоставки

Концепцията за кардиокохерентност (КК), разработена от Института HeartMath (САЩ), определя това състояние като синхронизация между различните системи на организма, която се проявява чрез хармоничен и синусоиден модел на вариабилността на сърдечния ритъм с пик в нискочестотния диапазон и е същностно ядро на психическата устойчивост. С други думи, КК е състояние на съгласувана работа на сърцето и дишането, при което сърдечният ритъм става по-равномерен и предсказуем, а организмът по-ефективно балансира работата на симпатиковата и парасимпатиковата част на вегетативната нервна система [1]. Режимът на КК се отразява чрез плавен, синусоиден модел на сърдечните ритми (кохерентност на сърдечния ритъм) и теснолентов, високамплитуден пик в нискочестотния диапазон на спектъра на ВСР, при честота около 0,1 Hz. За илюстриране на това заключение на фиг. 1 е даден спектър на мощността на вариабилността на сърдечния ритъм в обичайно състояние и в състояние на КК.



а) б)

Фиг. 1. Спектър на мощността на вариабилността на сърдечния ритъм в обичайно състояние (а) и в състояние на КК (б)

Високата ефективност на този режим се дължи на това, че той подпомага поддържането на физиологично ефективно и хармонично вътрешно състояние, характеризиращо се с намаляване на хаоса в нервната система и увеличаване на синхронизацията и хармонията в динамиката на цялата система на организма. Такъв психофизиологичен режим, наречен още физиологична кохерентност, подпомага изцелението и рехабилитацията, емоционалната стабилност и оптималната работоспособност [1, 2]. Това уникално свойство на КК определя широкия спектър на неговото приложение. В медицината КК е изключително полезно допълнение към програмите за лечение на хронични заболявания, които са свързани с емоционален стрес или се влошават от него, включително фибромиалгия, хронична умора, хипертония, астма, чувствителност към хелиомагнитни излъчвания, проблеми със съня, диабет, сърдечни аритмии и много други.

КК успешно се използва в програми за кардиологична рехабилитация, като помага на пациентите да намалят стреса и да повишат ефективността на сърдечно-съдовата система. Клиничните изследвания показват значителни подобрения във функционалните възможности при пациенти със сърдечна недостатъчност и значително снижаване на кръвното налягане при хипертоници.

В спорта води до повишаване на спортните резултати. Помага на спортистите да се научат да влизат стабилно в състояние на върхово представяне, което максимизира емоционалната стабилност, концентрацията и физическата координация. Намалявайки стреса преди състезание, създава условия за успешно представяне.

Психология. Едно от най-важните направления на приложение е стабилизирането на нервната система за намаляване на тревожността и рязкото увеличаване на когнитивните способности на човека. По този начин значително се подобрява възможността за вземане на решения в стресови условия. Ясно е, че такова свойство на КК е изключително полезно за аерокосмическия персонал при вземане на решения в екстремни (аварийни) ситуации. Например, изследване в Академията на ВВС на САЩ показва, че кандидатите с по-висок базов парасимпатиков тонус демонстрират по-добра издръжливост и адаптивност по време на летателната подготовка [3, 4]. В проведените изследвания също се отбелязва, че стойността на теста за нивото на КК е отличен допълнителен инструмент към когнитивните и психометричните оценки при вземането на решения за подбор на персонал.

Още едно важно приложение на КК. Това е приложението за повишаване на производителността при изпълнение на служебните задължения. Освен подобряването на физическото и емоционалното здраве, намаляването на тревожността и „умствения шум“, стабилизирането на динамиката на нервната система и създаването на висока кохерентност,

такова състояние помага на хората сами да се научат да предизвикват и поддържат висока производителност в дейността си.

По този начин технологиите за формиране на КК намират все по-широко приложение в клиничната практика, в психологията, в спорта за подобряване на здравето и човешката работоспособност. Тези технологии могат лесно да се използват за създаване на психофизиологично състояние, което подпомага намаляването на стреса, а значи улесняват и физическата, умствената и емоционалната регенерация.

Ясно е, че всички изброени свойства на КК са изключително полезни за използване в аерокосмическата индустрия с цел подобряване на качеството на професионалната дейност.

Възможности на кардиокохерентността за профилактика и минимизиране на симптомите на професионално прегаряне

Разглеждаме още един важен аспект в прилагането на технологията за КК. Както е известно, напрежението в работата на аерокосмическия персонал способства за професионално прегаряне. При неговото проявяване рязко намалява способността на човека да приема правилни решения в екстремни аварийни ситуации. Влошава се комуникабелността и значи се усложнява взаимодействието между членовете на колектива. За диагностициране на синдрома професионално прегаряне (ПП) най-често се използва тест на Маслач (MBI), който е преминал апробация в целия свят и се явява своего рода „златен стандарт“. Степента на професионално прегаряне се определя по стойностите на параметрите на теста: EE (емоционално изтощение), DP (отдръпнатост, цинизъм), PA (чувство за лични постижения). Обаче използването на този тест има недостатъци: продължителност при попълването, необходимост от отвличане от основната дейност и, главно, резултатите носят субективен характер.

Възстановяването на КК е мощен фактор за предотвратяване на прегарянето. Анализът на публикациите на водещите изследователски кардиологични центрове в света позволява да се стигне до извода, че едно от перспективните направления в тази насока е прилагането на технологията за формиране на кардиокохерентност с използването на биологична обратна връзка във виртуална среда [5, 6]. Пример за реализиране на такъв подход – изменение на параметрите EE, DP, PA по теста на Маслач (MBI) за професионално прегаряне са представени в нашата статия „Система за виртуална реалност, имитираща околната среда в Родопите и Рила, за формиране на кардиокохерентност у операторите на ергатични комплекси“, публикувана в сборника от материали на конференцията.

Изследователите Wekenborg, M., Böckelmann, M., Sveinsdóttir, H., Kim, J., et al. [4] установяват, че между метриките RMSSD, SDNN, HF, LF/HF на ВСР и параметрите EE, DP, PA на теста на Маслач съществуват значими корелационни зависимости. Във връзка с това е оправдано да се констатира, че параметрите на теста на Маслач и значимите метрики на ВСР могат да бъдат определени като EE ≈ f (RMSSD, HF, LF/HF), DP ≈ f (SDNN, RMSSD), PA ≈ f (HF, SDNN). Използвайки многофакторна линейна регресия, може да се запише:

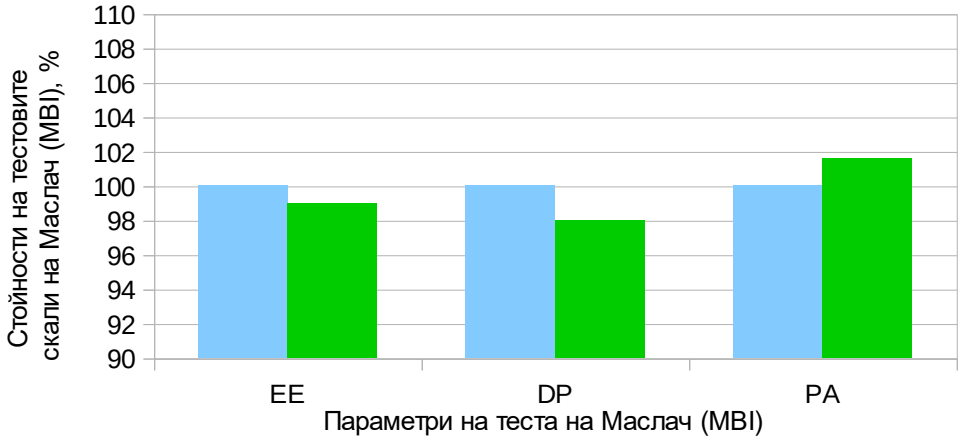
(1) $$EE = a_1 SDNN + a_2 RMSSD + a_3 LF / HF$$

(2) $$DP = \beta_1 SDNN + \beta_2 RMSSD$$

(3) $$PA = \gamma_1 SDNN + \gamma_2 HF$$

където SDNN – стандартно отклонение на нормалните RR интервали [7], мсек; RMSSD – изчислява се посредством корен квадратен от средната квадратична разлика между всеки два последователни нормални интервала [7], мсек; HF – мощност на спектъра на ритмограмата във високочестотния диапазон 0,40 – 0,15 Хц; LF/HF – индекс, отразяващ симпатовагалния баланс [7]; a_1, a_2, a_3, β_1, β_2, γ_1, γ_2 – регресионни коефициенти.

Определянето на конкретните стойности на коефициентите a_1, a_2, a_3, β_1, β_2, γ_1, γ_2 е направено за експеримент, чийто резултати са представени на фиг. 2 (за повече подробности виж нашата статия „Система за виртуална реалност, имитираща околната среда в Родопите и Рила, за формиране на кардиокохерентност у операторите на ергатични комплекси“, публикувана в сборника от материали на конференцията). Получени са следните стойности на коефициентите: a_1 = -0,93; a_2 = 0,07; a_3,=0,87; β_1 = -0,14; β_2 = 0,28; γ_1 = -0,44; γ_2 = 0,1.



Фиг. 2. Нива на параметрите EE, DP, PA на теста на Маслач (MBI) (син цвят) и стойности на същите параметри, изчислени по формули (1), (2), (3) (зелен цвят)

На фиг. 2 са показани стойностите на параметрите EE, DP, PA според теста на Маслач и стойностите на същите тези параметри, изчислени по формули (1), (2), (3), типични за жена на възраст 50–55 г. За удобство на анализа тук стойностите на параметрите по теста на Маслач се приемат за 100%, след това съответно се показват измененията (увеличение/намаление) на този параметър (стойности в %).

Както се вижда от диаграмата (фиг. 2), разликите в параметрите EE, DP, PA по теста на Маслач и получените директно при тестване и изчислени според метриките на ВСР са доста незначителни, около 1,5%. Това показва, че предложеният метод дава възможност да се определи степента на професионално прегаряне дистанционно, чрез анализ на ВСР метриките. Достатъчно е да се запише само последователността на RR интервалите, използвайки пулсов датчик и по телеметрия да се преработят само тези данни. Например, за пребиваващи на МКС космонавти или оператори за управление на полетите, без да се нарушава тяхната професионална дейност. Така в екстремни състояния при високо ниво на професионално прегаряне може да се предложи на човека да измени формата на дейност, а в някои, особено екстремни условия, да се блокират неговите погрешни действия.

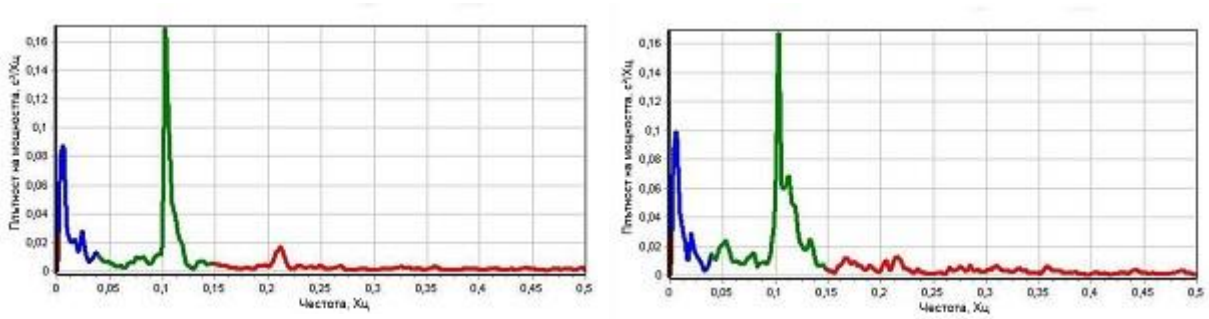
Важна забележка. Идеално е да се определят коефициентите α, β, γ за регресионните уравнения на конкретен човек, т.е. за човека, за когото параметрите на теста на Маслач ще се измерват дистанционно. В този случай грешката ще е около 1%. Ако тези коефициенти се определят за група, формирана по полов и/или възрастов критерий, грешката ще се увеличи, според предварителните данни, до 10–12%.

За един уникален метод за формиране на КК

Уникалните свойства на кардиокохерентността ни карат да се замислим за най-ефективните методи за нейното постигане. Анализът на водещи специалисти в тази област и най-вече на специалисти от Института XeartMath (САЩ), позволява да се посочат следните методи за формиране на КК: дихателни техники, медитативни практики, биологична обратна връзка и много други. Нека откроим най-ефективната, интересна и удивителна практика за формиране на КК.

През август 2021 г. по време на експедиция в Тетевен (Стара планина, България), изследвайки благотворното влияние на околната среда върху човека, е фиксиран странен феномен – синхронизирано формиране на голяма кардиокохерентност при двама души. Регистрирано е наличие на аномално висок пик на честота 0,1 Хц в спектрограмата на ВСР. Амплитудите на пика се оказват равни една на друга и няколко пъти превишават най-добрите практики за формиране на КК. На фиг. 3 е показана спектрограмата на ВСР за този случай (Г., мъж, 75 г. и (б) – Н., жена, 74 г.

Една важна подробност. Тези хора са много влюбени един в друг. Нека сега не се спираме на темата „Любовта няма възраст“. Нека разгледаме абстрактно този феномен. Първо, открит е устойчив ефект на кардиокохерентност, спектрограмата не се променя в продължение на дълго време. На второ място, метриките на ВСР – маркери на КК потвърждават възникването на кардиорезонанс. Същото потвърждават и психолого-медицинските корелати на КК.



а) б)

Фиг. 3. Спектър на мощността на вариабилността на сърдечния ритъм в състояние на КК, (а) – Г., мъж, 75 г. и (б) – Н., жена, 74 г. (Тетевен, Стара планина, България)

В многобройни публикации има потвърждение за възможността на такъв ефект. McCraty R., Atkinson M., Tomasino D. показват, че емоционалната близост и съвместните положителни преживявания усилват синхронизацията на сърдечните ритми между участниците, което потвърждава съществуването на феномена на междуличностна кохерентност [2]. Edwards S.D., Edwards D.J. демонстрират, в изследването си, че практиката на медитация на любовта подпомага растежа на глобалната кохерентност и междуличностния резонанс, свързвайки емоционалните и физиологичните нива [8]. Kramer F. предлага модел от 12 механизма на сърдечна кохерентност, включително физиологични, енергийни и колективни аспекти, разглеждайки любовта като най-висша форма на единство и резонанс [9]. McCraty R., Childre D. доказват, че емоциите на любов и благодарност предизвикват устойчив модел на ВСР, отразяващ хармония между сърцето и мозъка. Работата се превръща в основа на концепцията за „сърдечна кохерентност“ [10]. Bradley R.T., McCraty R. описват феномена „съкохерентност“ – синхронизация на сърдечни ритми между хора при емоционална връзка, което потвърждава междуличностния аспект на кохерентността [11]. Tiller W.A., Dibble W.E. разглеждат влиянието на енергийните полета на съзнанието и емоциите върху физиологичната кохерентност, особено при състояния на любов и състрадание [12].

Анализирайки публикациите на водещите специалисти в областта на КК, може да се направи извод, че в случай на любов не става дума просто за кардиокохерентност в класическия смисъл, а за разширена кохерентност, при която са активирани следните компоненти: физиологична (сърце ↔ дишане ↔ автономна регулация), емоционална (устойчив позитивен афект), междуличностна (синхронизация на два организма). Така може да се заключи, че любовта може да поражда „кохерентност от по-висок порядък“, при която физиологията е само част от цялостния резонанс. С други думи, по-просто казано: класическата сърдечна кохерентност е физиологичен патерн на ВСР. Кохерентността при любовта е разширено състояние, включващо физиология, емоции, когнитивна и междуличностна синхронизация [9].

Може да се направи опит да се обясни защо любовта може да бъде „особена кохерентност“:

1) многостепенност: любовта обединява не само физиологичната регулация (ВСР, дишане), но и дългосрочните когнитивни нагласи (привързаност, доверие), както и социалния контекст (взаимоотношения, споделен опит);

2) синхронизация на няколко нива: в състояние на любов се наблюдава не само сърдечно-дихателна кохерентност, но и междуличностна – синхронизация на ритмите при двама души (сърце ↔ дишане ↔ мозъчна активност);

3) енергийният аспект: много изследователи отбелязват, че любовта създава по-устойчив и „дълбок“ модел на кохерентност в сравнение с краткотрайните емоции на радост или благодарност [12].

По този начин се отбелязва разликата от другите емоции: радост или благодарност, които могат да предизвикат временно покачване на кохерентността, а любовта формира устойчиво състояние, което се поддържа дори без външни стимули.

И така, любовта може да бъде „особена кохерентност“, тя може да поражда „кохерентност от по-висок ред“, където физиологията става само част от цялостния резонанс, където любовта се превръща в източник на устойчив резонанс не само вътре в човека, но и между хората. Нека си спомним уникалните психофизиологични свойства на КК (вижте раздел «Теоретични предпоставки»).

Струва ли си да се учудваме, че между хора, свързани с високи чувства, се реализират напълно възможностите на КК (самовъзстановяване на организма, активиране на защитните механизми на имунната система, растеж на когнитивните способности и др.).

Обобщавайки изложеното по-горе, може да се направи извод, че КК е универсална технология за възстановяване на психосоматичното състояние, намалява стреса. Тя има пряка практическа стойност за надеждността на професионалната дейност и заслужава да бъде въведена в авиационната и космическата медицина.

Заключение

Направените изследвания потвърдиха, че технологията за кардиокохерентност (КК) с успех може да използва за оптимизиране на дейността на аерокосмически персонал. Свойствата на КК (намалява тревожността, повишава концентрацията на вниманието, намалява на грешките при извънредни ситуации, увеличава когнитивните способности, създава устойчивост към продължителен стрес и изолация и т.н.) са изключително полезни за използване в аерокосмическата индустрия с цел повишаване на качеството на професионалната дейност.

КК може да се постигне чрез прости методи: резонансно дишане, биофидбек по ВСР, практики за осъзнатост и положителни емоции. Тези технологии са достъпни и могат да бъдат включени в програмите за подготовка на аерокосмическия персонал

Нашите изследвания потвърдиха, че показателите на ВСР са обективен биомаркер за професионално прегаряне (ПП). Предложеният метод дава възможност да се определи степента на ПП дистанционно. Например, за пребиваващи на МКС космонавти или оператори за управление на полетите, без да се нарушава тяхната професионална дейност. Така в екстремни състояния при високо ниво на ПП може да се предложи на човека да измени формата на дейност, а в някои, особено екстремни условия, да се блокират неговите погрешни действия.

Още едно достойнство на разглеждания метод на диагностика е да се прилага при предварителен подбор за изпълнение на професионалните задължения. Той е приложим и за избор на оптимална организация за възстановяване на организма.

Литература:

1. McCratty, R., & Zayas, M. A. (2014). Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability, and psychosocial well-being. Front. Psychol. 5:1090.
2. McCraty R, Atkinson M, Tomasino D, Bradley RT. The coherent heart: heart brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order. Boulder Creek, CA: Institute of Heartmath; 2009.
3. Li W-C, Chiu FC, Kuo YS, Wu KJ. The investigation of visual attention and workload by experts and novices in the cockpit.: Harris D, Engineering psychology and cognitive ergonomics. Applications and services. Springer Berlin Heidelberg; 2013:167–76.
4. Sammito, S., et al. (2025). Heart rate variability as a biomarker of stress and burnout in military aviation personnel. Occupational Medicine, 75(4), 312–320.
5. Wekenborg, M., et al. (2019). Vagal tone predicts burnout symptoms: Longitudinal evidence from the Dresden Burnout Study. Psychophysiology, 56(12), e13456.
6. Böckelmann, I., et al. (2026). Heart rate variability and burnout risk in employees: A cross-sectional study. Frontiers in Physiology, 17, 1523456.
7. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. // Circulation. Vol. 93, 1996. pp. 1043–1065.
8. Edwards S. D., Edwards D. J. Contemplation and transmission of love via the HeartMath Global Coherence Application // Dialogo Journal. – 2023. – Vol. 9, № 2. – pp. 103–111.
9. Kramer F. The twelve mechanisms of heart coherence: Mapping a field of unity // Academia.edu. – 2025.
10. McCraty R., Childre D. Heart-brain synchronization and emotional states // Integral Review. – 2022. – Vol. 18, № 1. – pp. 45–62.
11. Bradley R. T., McCraty R. Coherence and social connection: Heart rhythm synchronization between individuals // Frontiers in Psychology. – 2021. – Vol. 12. – pp. 654321.
12. Tiller W. A., Dibble W. E. Consciousness and subtle energy fields in human physiology // Journal of Scientific Exploration. – 2020. – Vol. 34, № 4. – pp. 567–582.

СИСТЕМА ЗА ВИРТУАЛНА РЕАЛНОСТ, ИМИТИРАЩА ОКОЛНАТА СРЕДА В РОДОПИТЕ И РИЛА, С ЦЕЛ ФОРМИРАНЕ НА КАРДИОКОХЕРЕНТНОСТ У ОПЕРАТОРИТЕ НА ЕРГАТИЧНИ КОМПЛЕКСИ

Геннадий Маклаков[2], Надежда Георгиева[2], Гаро Мардиросян[1], Момчил Караиванов[3], Оксана Кудрявцева[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Научно-изследователски център за биофотоника – Смолян
[3]Областна администрация – Смолян
e-mail: g.maklakov@gmail.com

Ключови думи: *Кохерентност на сърдечната честота, емоционални състояния, биологична обратна връзка, виртуална реалност*

Резюме: *Представени са резултати от проучвания за прилагане на системи за виртуална реалност (ВР), имитиращи рекреационни зони, като целта е да се постигне устойчиво хармонично функциониране на психофизиологичните системи на човека за оптимизиране на неговата професионална дейност. Предложен е метод за формиране на кардиокохерентност с технологията за обратна връзка при вариабелността на сърдечния ритъм във ВР. Създаден е софтуер за избор на оптимален ритъм на дишане с използване на 3D филми, снимани в Родопите и Рила, чрез преобразуване на видеото в стерео формат по технологията SBS.*

A VIRTUAL REALITY SYSTEM SIMULATING THE ENVIRONMENT IN THE RHODOPES AND RILA MOUNTAINS, AIMED AT DEVELOPING CARDIAC COHERENCE IN OPERATORS OF ERGATIC COMPLEXES

Gennadii Maklakov[2], Nadezhda Georgieva[2], Garo Mardirossian[1], Momchil Karaivanov[3], Oksana Kudriavtseva[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Biophotonics Research Centre – Smolyan
[3]Regional Administration – Smolyan
e-mail: g.maklakov@gmail.com

Keywords: *Heart rate coherence, emotional states, biological feedback, virtual reality*

Abstract: *This paper presents the results of studies on the application of virtual reality (VR) systems ms that simulate recreational environments, with the aim of achieving a sustainable, harmonious functioning of the human psychophysiological systemсек in order to optimise professional performance. A method is proposed for inducing cardio-coherence using heart rate variability feedback technology in VR. Software has been developed to select the optimal breathing rhythm using 3D filмсек shot in the Rhodope and Rila mountains, by converting the video into stereo format using SBS technology.*

Въведение

Има безброй доказателства, че за безопасността на сложните ергатични системи решаваща роля играе умението на човека да приема правилни решения. В екстремни ситуации обаче психиката е подложена на силно натоварване и са възможни психически нарушения. Те често провокират възникването и развитието на сериозни соматични заболявания. По тази причина е важно и много актуално разработването на системи и методики за подобряване на психосоматичното състояние с цел да се съхрани целостността и стабилността на човека (или на група хора). Едно от перспективните направления в тази насока е използването

на технологията за формиране на кардиокохерентност, основните положения за която са разработени в Института XeartMath (САЩ).

Една от тенденциите за формиране на кардиокохерентност е използването на рехабилитиращото въздействие на околната среда, добре известно и потвърдено от многобройни публикации, в това число и наши [1–5]. В България съществуват множество уникални зони със силно и благотворно въздействие – Стара планина, Родопите, Рила и др. [1–3]. Непосредственото «потопяване» в благотворна екологична среда, за съжаление, не винаги е възможно. На помощ идват системите за виртуална реалност [7, 8]. Особена ценност придобиват системите за виртуална реалност (СВР), тъй като в тях е възможно да се реализира биологична обратна връзка във виртуална среда (БОВ-ВС) за формиране на кардиокохерентност.

Теоретична обосновка на такъв подход са представени в нашата статия „Технологията за кардиокохерентност в практиката за възстановяване след стрес и осигуряване на надеждност в професионалната дейност на авиационния и космическия персонал“, публикувана в сборника от материали на Конференцията.

Използване на анализ на ритмограма за оценяване на кардиокохерентността

Показателите от ритмограмата отразяват състоянието на механизмите за регулиране на физиологичните функции на човешкото тяло, по-специално общата активност на регулаторните механизми, неврохуморалната регулация на сърцето, както и връзката между симпатиковия и парасимпатиковия отдел на вегетативната нервна система.

Кардиокохерентността може да се оцени, при това с голяма точност, по параметрите на вариабелността на сърдечния ритъм (ВСР). Според стандартите, приети в САЩ и Европейския съюз [9], за анализ на ритмограмите са използвани следните показатели, приети за най-информативни при анализ на кардиокохерентността: TP е общата мощност на спектъра на ритмограмата, мсек^2; LF е мощността на спектъра на ритмограмата в нискочестотния диапазон 0,15–0,04 Hz, мсек^2; HF е мощността на спектъра на ритмограмата във високочестотния диапазон 0.40–0,15 Hz, мсек^2; LF/HF – индекс, отразяващ симпатовагалния баланс.

Ключова идея на нашия подход за използване на виртуална реалност за формиране на кардиокохерентност

Изходна теза. Използването на биологична обратна връзка във виртуална среда увеличава нейната ефективност**.**

Обосновка. Виртуалната реалност (ВР) създава по-поглъщащи условия, където вниманието е съсредоточено, разсейващите фактори са минимизирани и дишането и сърдечният ритъм се синхронизират по-лесно. С прости думи – човек се чувства вътре в случващото се, а не просто наблюдава отстрани**.** По този начин ВР действа като усилвател на БОВ-ВС, разширявайки нейното приложение, прави метода по-универсален – полезен не само за медицина, спорт, образование и превенция на професионално изтощение, но и за използване от оператори на ергатични системи за стабилизиране на състоянието си и оптимизиране на работоспособността.

Основни идеи за реализиране на нашия подход. 1) Барорефлекс като система за управление. Сърдечният ритъм (СР) и съдовият тонус (СТ) се регулират от барорефлексите – затворени системи с отрицателна обратна връзка и закъснение. Тези закъснения създават резонансни честоти. 2) Две ключови резонансни честоти ~ 0,1 Hz – свързана със сърдечния барорефлекс, и ~ 0.03 Hz – свързана със съдовия барорефлекс. Тези честоти усилват колебанията на СР и СТ при ритмична стимулация.

Методи за стимулиране на резонанс. 1) Дишане с честота около 0,1 Hz (6 вдишвания/издишвания в минута) предизвиква устойчиви високо амплитудни колебания и се използва в БОВ-ВС. 2) Ритмично стягане на мускулите с 0,1 Hz също предизвиква резонанс, особено в съдовия тонус. 3) Емоционални визуални стимули при подаване с честота 0,1 Hz усилват сърдечните реакции и позволяват оценяване на емоционалното вълнение. Такъв подход определя клиничното значение на нашия метод. 1) БОВ-ВС за резонансна честота е доказала ефективност при астма, депресия, фибромиалгия, неврози и хипертония. 2) Ритмично мускулно напрежение и визуални стимули могат да се използват за профилактика на вазовагални реакции, рехабилитация след инсулт или инфаркт, както и в спортната медицина. 3) Изследването на резонанс при 0,03 Hz открива перспективи за нови методи на терапия, включително използване на музика или меки стимули. Практическата реализация на БОВ-ВС е проведена в две направления.

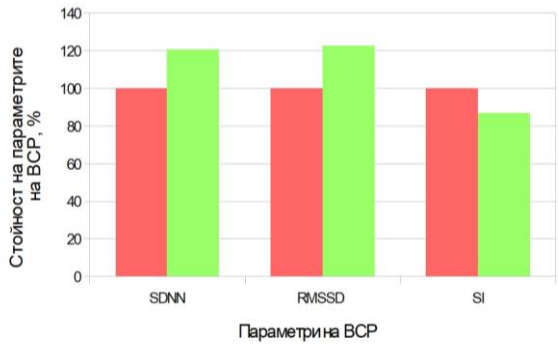
Първо направление. Стерео видео с прост индикатор за дишане "топче нагоре-надолу" (вертикалното движение на топчето се наслагва върху видеото) за телефон във ВР шлем.

Предимства на такъв подход: 1) Потапяне без сложна техника: дори просто стерео видео на природата с индикатор за дишане създава усещане за потапяне и намалява разсейващите фактори. 2) Фокусиране на вниманието: движещото се топче задава ритъма на дишането, а ВР средата усилва концентрацията върху процеса. 3) Достъпност: не са нужни скъпи слушалки или сложни сензори – достатъчен е смартфон и прости ВР очила. Ползи от прилагането на такъв подход: 1) Гъвкавост при използване: в медицината, включително авиационната медицина, психологията, спорта и др. (релаксация, профилактика на изтощение, когнитивни тренировки и т.н.).

Второ направление. Хибридна схема: ВР видео + индикатор на дишането и свързване на ВСР сензор (Polar, Empatica, Shimmer и др.). В този случай топчето може да се движи не само по зададения ритъм, но и да се адаптира към реалните физиологични данни на потребителя. В тази публикация е разгледано първото направление. За реализирането на БОВ-ВС е разработен специализиран софтуер на Python, който осигурява създаването на висококачествен стерео контент (висока резолюция – поне 2560 × 720 и плавност – 30–60 FPS), предвижда се изчисляването на необходимите ВСР метрики и реализирането на различни режими на интерактивно управление на ВР. За най-пълна проверка, освен ВР с използване на очила, беше реализирана възможност за гледане на стерео съдържание на таблет, настолен компютър и на големи екрани. Проучванията са извършени със следното оборудване: реоплетизмограф и портативен кардиограф на компания "ART INTECH", очила за виртуална реалност, модел SC-G04C/SC-B03; мобилни телефони клас Xiaomi Redmi Note. За да гледаме 3D видео съдържание, използвахме лаптоп (15" монитор), настолен компютър (24" монитор) и телевизор (65" екран).

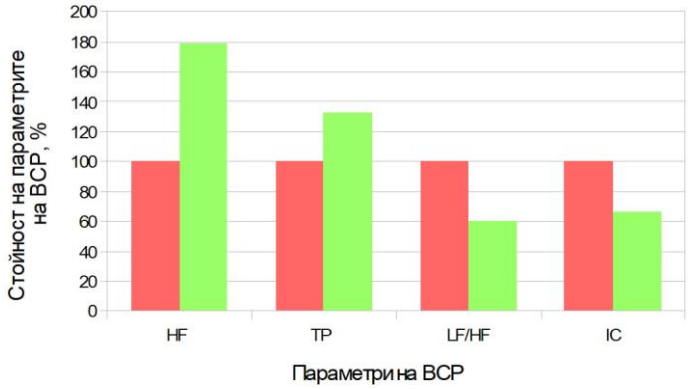
Използване на анализ на ритмограма за оценяване на кардиокохерентността

Съгласно европейските стандарти за измерване и физиологична интерпретация на ВСР [9] за представяне на резултатите от изследванията са избрани следните параметри: SI, SDNN, RMSSD, IC, TP, индекс LF/HF, мощност на спектъра в областите VLF, LF, HF. На фиг. 1 е показано състоянието на параметрите SDNN, RMSSD, SI преди и след сеанс с БОВ-ВС (3D филм „Горско поточе“, Рила), типично за жена на възраст 50–55 г. За удобство на анализа, тук и по-нататък, стойностите преди сеанса се приемат за 100%, след това съответно се показват измененията (увеличение/намаление) на този параметър (стойности в %).



Фиг. 1. Нива на параметрите SDNN, RmsSD, SI (червен цвят) преди сеанса с БОВ-ВС и след това (зелен цвят)

Както се вижда от диаграмата (фиг. 1), преди използване на система за моделиране на избрана околна среда на базата на СВР, нарастват показателите SDNN на 20,8% и RMSSD на 22,9%. Ръстът на SDNN показва увеличаване на общата вариабилност на сърдечния ритъм, което води до следните положителни ефекти: подобряване на адаптацията към натоварвания и стрес, по-бързо възстановяване на психоемоционалното състояние (което намалява риска от преумора), повишаване на устойчивостта към стрес, подобряване на общото самочувствие, настроение и на когнитивните функции (концентрация, памет). Ръстът на RmsSD подчертава усилването на активността на парасимпатиковото (вагусово) звено на вегетативната нервна система, което показва активиране на процесите на възстановяване на организма след физиологичен или емоционален стрес. Повишава се адаптацията към условията на професионалната дейност. Като цяло има засилено влияние на парасимпатиковата нервна система (чрез активиране на блуждаещия нерв), която е отговорна за възстановяване и релаксация. Параметърът SI е намалял с 13,2%, което показва понижаване на нивото на стрес след сеанс на 3D филм "Горски поток". Представлява интерес анализът на спектралните характеристики на ритмограмите преди и след сеанса със СВР. На фиг. 2 е показано състоянието на параметрите TP, HF, LF/HF, IC преди и след сеанс БОС-ВС (3D филм «Горско поточе», Рила), типично за жена на възраст 50–55 г.



Фиг. 2. Нива на параметрите TP, HF, LF/HF, IC на спектъра преди (червен цвят) използване сеанс на БОС-ВС и след това (зелен цвят)

Както се вижда от диаграмата (фиг. 2), общата мощност на спектъра TP след сеанса със СВР увеличилась на 32,3%, что отражает возрастание суммарной активности вегетативных воздействий на сердечный ритм, также указывает на активацию парасимпатического отдела ВНС. HF е мощността на високочестотния спектър, свързан с парасимпатиковата активност. Следователно, рязко увеличение на параметъра HF с 78,9% показва значителна активация на парасимпатиковия АНС. Намаление от 39,5% в индекса LF/HF показва промяна в автономния баланс към преобладаващо парасимпатиковото (вагално) влияние. Намаление на индекса на централизация на IC с 33,7% показва увеличаване на автономната регулаторна верига и, съответно, намаляване на влиянието на централните регулаторни механизми върху сърдечния ритъм. Това може да се дължи на увеличаване на влиянието на парасимпатиковата нервна система, например по време на сън, почивка или при намаляване на нивата на стрес. Всички данни от анализа на ритмограмите потвърждават ефективността на сеанс с БОС-ВС за формиране на кардиокохерентност и совпадают с выводами других исследователей [10–11].

На фиг. 3 е показано състоянието на параметрите EE, DP, PA теста Маслач (MBI) на професионално изгаряне преди и след сеанс със БОС-ВС (3D филм «Горско поточе», Рила), типично за жена на възраст 50–55г.

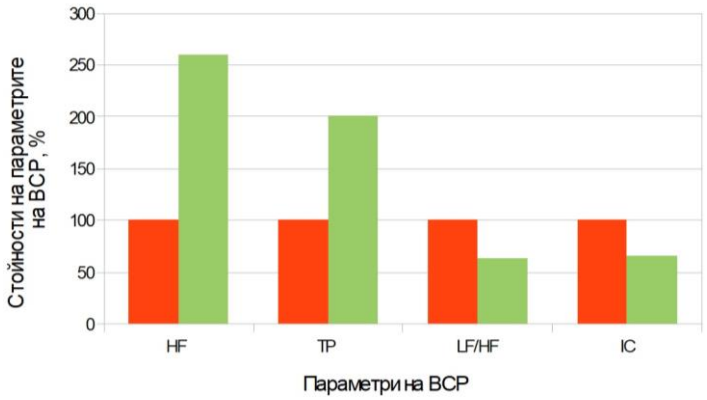
Както се вижда от диаграмата (фиг. 3), намаляването на параметъра EE с 11,8% показва намаляване на психо-емоционалното изтощение, човекът започнал да усеща по-малко хронична умора, трудности с концентрацията и спад в мотивацията, което е признак, че ресурсите се възстановяват и влиянието на изгарянето върху професионалната дейност отслабва. Параметърът DP е намалял с 16,7%, което говори за увеличаване на социалната адаптация, намаляване на раздразнителността и нетърпимостта в комуникационните ситуации, негативизъм към колегите. Параметърът PA практически не се е променил (с оглед на грешката при измерването). Като се вземе предвид намаляването на параметрите EE и DP, както и това, че първоначално (преди сесията) нивото на PA е било високо, можем да заключим, че човекът все още запазва адекватна самооценка на своите професионални успехи и няма изместване към обезценяване на своя труд. Всички данни от анализа на резултатите от теста за профессионално прегаряне потвърждават ефективността на сеанс с БОС-ВС за формиране на кардиокохерентност.



Фиг. 3. Нива на параметрите EE, DP, PA теста Маслач (MBI) на професионално прегаряне преди (червен цвет) използване на сеанс с БОВ-ВС и след това (зелен цвят)

Важно да се подчертае една особеност при формирането на кардиокохерентност – има различни начини за нейното постигане, които често са по-ефективни от резонансното дишане, разглеждано в тази статия. Някои от тях са анализирани в статията „Технологията за кардиокохерентност в практиката за възстановяване след стрес и осигуряване на надеждност в професионалната дейност на авиационния и космическия персонал“ (вж. настоящия сборник).

Като илюстрация ще разгледаме аналогични изследвания, проведени в Родопите през 2018–2020 г. (в рамките на експедиции за изследване на влиянието на екологията върху състоянието на човека). Първо бяха определени маршрути с най-благотворно въздействие на природата върху човека (с оглед на препоръките на технологията “Shinrin-yoku” [5, 6]). Бяха (според резултатите от изследванията) създадени съответните видеоклипове за СВР. Те показаха висока ефективност по време на КОВИД епидемията. Нека ги разгледаме от гледна точка на формирането на кардиокохерентността. На фиг. 4 е показано нивото на параметрите TP, HF, LF/HF, IC на спектъра преди провеждането на сесия БОС-ВС и след това, типично за мъж на възраст 70–75 г.



Фиг. 4. Нива на параметрите TP, HF, LF/HF, IC на спектъра преди (червен цвят) използване на сеанс на БОС-ВС и след това (зелен цвят). СВР: 3D филм «Каньон на водопадите» (Орфеев водопад, Родопи).

Както се вижда от диаграмата (фиг. 4), общата мощност на спектъра TP и мощността на високочестотния спектър HF след сеанса със СВР значително се увеличават – с 200% и 260% съответно. Впечатляващо! Такова рязко увеличение показва значително повишаване на сумарната активност на вегетативните въздействия върху сърдечния ритъм, което говори за значително активиране на парасимпатиковия дял на ВНС. HF е мощността на високочестотния спектър, свързана с парасимпатиковата активност. Това е типично за мъж на възраст 70–75 г. За също влияние свидетелства и рязкото увеличаване на параметъра HF. Намалението с 63% на индекса LF/HF показва възстановяване на организма и значително освобождаване от стреса. Намалението на индекса на централизация IC с 66% сочи за усилване на автономния контур на регулация и, съответно, за намаляване влиянието на централните механизми на регулация върху сърдечния ритъм. Комбинацията от рязкото увеличение на тези параметри води до значително намаляване на стреса според индекса SI – с 202%. Всички данни от анализа потвърждават ефективността на сеанс с БОС-ВС за формиране на кардиокохерентност.

Заключение

Системи за виртуална реалност (СВР), имитиращи рекреационни зони, с използването на технологията за формиране на кардиокохерентност (ТФК), способстват за постигане на устойчиво хармонично функциониране на психофизиологичните системи на човека и оптимизиране на неговата професионална дейност.

Специални 3D филми, използващи ТФК, с успех могат да се прилагат като допълнителна възстановителна терапия, за профилактика и възстановяване на психосоматичното състояние на лица, изпитали силно психическо натоварване.

Такива системи са изключително подходящи за възстановяване на психоемоционалното състояние на хора, заети в критични производства, изискващи от тях стабилна психика (авиация, космонавтика, оператори в АЕЦ и т.н.).

Предложеният подход подпомага също възстановяване на психическото състояние, коригиране на професионалното изчерпване и повишаване работоспособността на заетите в аерокосмическия отрасъл.

Литература:

1. Маклаков Г., Георгиева Н., Караиванов М. Приложение на биофотонната визуализация за мониторинг на рекреационни зони в Родопите и въздействието им върху психосоматиката на човека. // Международна научна конференция «Космос. Екология. Сигурност “SES-2020”». Сборник доклади. ИКИТ-БАН. София. 2020. С. 298–303.
2. Маклаков, Г., Георгиева Н., Малев Е. Изследване на перспективни рекреационни зони в България за рехабилитация и профилактика чрез хронофизиотерапия на работещи в аерокосмическия отрасъл. // Международна научна конференция «Космос, Екология, Сигурност “SES-2018”». Сборник доклади. ИКИТ-БАН. София. 2018. С. 335–340.
3. Маклаков, Г., Георгиева Н. Приложение на метода газоразрядна визуализация за изследване на перспективни рекреационни зони в Крушунския край (България). // Международна научна конференция «Космос, Екология, Сигурност “SES-2017”». Сборник доклади. ИКИТ-БАН. София. 2017. С. 255–261.
4. Bowler, D.E.; Buyung-Ali, L.M.; Knight, T.M.; Pullin, A.S. A Systematic Review of Evidence for the Added Benefits to Health of Exposure to Natural Environments. BMC Public Health 2010, 10, 456. McMahan, E.A.; Estes, D. The Effect of Contact with Natural Environments on Positive and Negative affect: A Meta-Analysis. J. Posit. Psychol. 2015, 10, 507–519.
5. Tsunetsugu, Y.; Park, B.J.; Miyazaki, Y. Trends in research related to “Shinrin-yoku” (taking in the forest atmosphere or forest bathing) in Japan. Environ. Health Prevent. Med. 2010, 15, 27–37.
6. Цинг Ли, "Шинрин-йоку“. Изкуството и науката на горското къпане". Издателска къща «Хермес», 2018 г
7. Маклаков Г., Георгиева Н. Изследване на екологорехабилитиращи звукови среди на рекреационни зони в България за рехабилитация и профилактика на работещи в аерокосмическия отрасъл. // Международна научна конференция «Космос. Екология. Сигурност “SES-2020”». Сборник доклади. ИКИТ-БАН. София. 2020. С. 292–297.
8. Маклаков Г., Георгиева Н. Синдромът емоционално прегаряне - как да стабилизираме психосоматичното състояние на авиационния и космическия персонал с използване на системи за виртуална реалност. // Международна научна конференция «Космос. Екология. Сигурност “SES-2023”». Сборник доклади. ИКИТ-БАН. София. 2023. С. 119–223
9. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. // Circulation. Vol. 93, 1996. p. 1043–1065.
10. McKee MG. Biofeedback: an overview in the context of heart-brain medicine. Cleve Clin J Med 2008; 75 (suppl 2):S31–S34.
11. Moravec CS. Biofeedback therapy in cardiovascular disease: rationale and research overview. Cleve Clin J Med 2008; 75(suppl 2):S35–S38.

ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ ПЪРВИЧНАТА ПРЕРАБОТКА НА ОТПАДЪЧЕН ПАМУЧЕН ТЕКСТИЛ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ВИСОКОКАЧЕСТВЕНА ЦЕЛУЛОЗНА СУРОВИНА

Нели Сивева, Калин Крумов, Весислава Тотева, Томислав Скандалиев, Христофор Скандалиев

Химикотехнологичен и металургичен университет – София
e-mail: nelisiveva@gmail.com; fori2ivanov@yahoo.com

Ключови думи: *Отпадъчен памучен текстил, кръгова икономика, целулоза, нитроцелулоза*

Резюме: *Разгледани са технологичните предизвикателства при първичната преработка на отпадъчен памучен текстил с цел получаването на висококачествена целулозна суровина, подходяща за последващо нитриране. За целите на изследването е проектирана експериментална пилотна инсталация, включваща специализиран малогабаритен шредер и спомагателни системи за физико-химична обработка. Основният акцент в процеса е поставен върху постигането на висока химична чистота и специфична реакционна способност на получената целулоза. Анализирани са критичните етапи на механично раздробяване и развлакняване, които осигуряват необходимата специфична повърхност и достъпност на реакционните центрове. Изследвани са физико-химичните методи за пълно отстраняване на багрила, апретури, липиди и асоциирани нецелулозни примеси. Проследени са измененията в степента на полимеризация и вискозитета на целулозата с оглед специфичните изисквания за хомогенност при последващата естерификация с азотна киселина. Експериментално са установени критичните фактори, определящи показателите и качеството на получената целулозна маса. Резултатите показват, че контролираната комбинация от механично раздробяване и химична подготовка осигурява висока чистота и равномерна реакционна способност на суровината – ключови условия за безопасното и ефективно протичане на процеса на нитриране. При оптимизирани технологични режими на предварителна обработка, полученият целулозен продукт покрива основните критерии за прекурсор при производството на целулозни нитрати. В заключение са обобщени препоръки за оптимизация на процесите при последващо мащабиране на подобен тип инсталации.*

TECHNOLOGICAL CHALLENGES IN THE PRIMARY PROCESSING OF WASTE COTTON TEXTILES FOR HIGH-QUALITY CELLULOSE FEEDSTOCK PRODUCTION

Neli Siveva, Kalin Krumov, Vesislava Toteva, Tomislav Skandaliev, Hristofor Skandaliev

University of Chemical Technology and Metalurgy – Sofia
e-mail: nelisiveva@gmail.com; fori2ivanov@yahoo.com

Keywords: *Cotton textile waste, circular economy, cellulose, nitrocellulose*

Abstract: *This study examines the technological challenges associated with the primary processing of waste cotton textiles to obtain high-quality cellulosic feedstock suitable for subsequent nitration. An experimental pilot-scale installation comprising a specialized compact shredder and auxiliary systems for physicochemical treatment was designed for the purposes of the study. The main focus of the process is on achieving high chemical purity and specific reactivity of the resulting cellulose. The critical stages of mechanical shredding and defiberization were analyzed to ensure the required specific surface area and accessibility of reactive sites. Physicochemical methods were investigated for the complete removal of dyes, finishing agents, lipids, and associated non-cellulosic impurities. Changes in the degree of polymerization and cellulose viscosity were monitored with regard to the specific homogeneity requirements for subsequent esterification (nitration). The critical factors determining the properties and quality of the resulting cellulose pulp were experimentally established. The results demonstrate that a controlled combination of mechanical shredding and chemical pretreatment provides high purity and uniform reactivity of the feedstock – key conditions for the safe and efficient nitration process. Under optimized pretreatment conditions, the resulting cellulose intermediate meets the essential criteria for use as a precursor in cellulose nitrate production. In conclusion, recommendations for process optimization during the subsequent scale-up of similar installations are summarized.*

1. Въведение

Съвременният бизнес и индустрия насочват мащабни усилия за осъществяване на устойчив преход към кръгова икономика, което вече не е въпрос на избор, а на необходимост. Едно специфично направление в този глобален тренд е оползотворяването на генерираните ежегодно огромни количества текстилни отпадъци като вторични суровини. В частност, в това изследване се разглеждат отпадните материали от памучен текстил, които представляват значителен дял от общия обем битови и промишлени текстилни отпадъци [1–3]. Това е суровина притежаваща висок потенциал за рециклиране поради естествения си целулозен произход и възможността за влагане на тази целулоза като прекурсор в производството на нитроцелулоза. Въпреки това, пряката употреба на този ресурс в подобен тип сложни химични синтези е силно затруднена от наличието в него на множество нецелулозни примеси [4, 5].

За разлика от традиционните целулозни източници (дървесина или памучен линтер), рециклирането на отпадъчен памучен текстил с цел нитриране е затруднено поради няколко негови проблемни характеристики:

- Присъствие на багрила, апретури, смоли, липиди и синтетични влакнести примеси, които са резултат от сложна и многоетапна история на обработка.
- Нехомогенност на физическата структура: Различна степен на кристалинност, съществуващи механични напрежения и ориентация на влакната, получени в резултат на предходни технологични цикли (тъкане, плетива, експлоатация).

С цел технологично решаване на посочените проблеми е стартиран научноизследователски проект за създаване на малка пилотна инсталация за предварителна обработка на отпадъчен текстил, предназначен за получаване на нитроцелулоза с високо азотно съдържание. Използван е **концептуално нов подход** за комплексна подготовка на отпадъчната суровина чрез комбинация от прецизно механично раздробяване и физико-химично пречистване. Основната хипотеза е, че контролираното управление на раздробяването чрез специализиран малогабаритен шредер, съчетано с оптимизирани режими на химично третиране, може ефективно да разруши надмолекулната структура на целулозата до степен, осигуряваща необходимата достъпност на хидроксилните групи при естерификацията с азотна киселина до получаване на целулозен нитрат [6, 7]. Етапът на първично сортиране на отпадъчния текстил и отделянето само на материали с високо съдържание на памук е изпълнен ръчно и не е включен като компонент за оптимизация на изпълняваната технологична схема. Усилията са насочени към решаване на следните два вида основни предизвикателства:

Конструктивни предизвикателства (оборудване и пилотна инсталация)

- **Оптимизация на шредерната система:** Проектиране на прецизни роторни ножове с регулируем просвет (междина между остриетата) и интегрирана допълнителна система за развлакняване на текстила.
- **Подходящ устойчив материал за реакторния блок:** Избор на химически устойчиви и достатъчно механично здрави материали за съдовете, способни да издържат на агресивни алкални и окислителни среди при предвижданите високи работни температури.
- **Хидродинамична ефективност:** Конструиране на бъркалки с променлива скорост и системи за контрол, които гарантират хомогенно разпределение на масата и добър масообмен при висок хидромодул и висок вискозитет на целулозната суспензия.

Технологични предизвикателства (процеси и параметри)

- **Селективно пречистване на материала:** Максимално възможно отстраняване на упорити нецелулозни примеси (синтетични багрила, апретури, смоли, липиди) чрез алкална обработка и избелване.
- **Контрол на pH на средата на всички етапи на мокра обработка:** Прецизно измерване за регулиране на киселинно-алкалния баланс и неутрализиране на технологичната среда преди следващите етапи за обработка на суровината.
- **Осигуряване на равномерна реакционна способност:** Постигане на максимална достъпност на хидроксилните групи в дълбочината на влакното при бъдещия процес на нитриране на целулозния прекурсор [8].

2. Материали и методи

2.1. Изходни суровини

За целите на експерименталната работа е използван отпадъчен памучен текстил с доказан произход, който предварително е бил отделен от общата отпадна суровина и съдържащ предимно памучни тъкани с декларирана чистота над 95% (Фиг. 2). Изходният материал включва изрезки от конфекция и фрагменти от стари изделия, които предварително са сортирани по цвят и механична здравина. С цел коректност на междинните изследвания са фиксирани следните базови характеристики на суровината [9]:

- Влажност: 6–10%
- Съдържание на нецелулозни примеси (липиди, восъци, багрила): до 5%
- Начална степен на полимеризация (DP): 1200–1800

2.2. Концептуален дизайн на експерименталната пилотна инсталация

В рамките на текущия етап от проекта е проектирана и частично въведена в експлоатация пилотна инсталация, чиято блок-схема (Фиг. 1) включва следните основни модули:

1. **Модул за механично раздробяване и развлакняване:** Централен елемент е специализиран малогабаритен едновалов шредер с висок въртящ момент. Той е оборудван с роторни ножове от легирана износоустойчива стомана, и регулируем просвет при рязане. Използвано е иновативно решение за последващо развлакняване, което директно поема от режещите ножове раздробения материал и го развлакнява допълнително до максимален обем, и висока специфична повърхност.

2. **Модул за физико-химично пречистване (реакторен блок):** Включва реактори, оборудвани с бъркалки с променлива скорост за последователно провеждане на алкална обработка, избелване и отстраняване на остатъчни апретури, и система за контрол на температурата и pH по време на работа. Химичната резистентност към агресивните водни разтвори и осигуряване на защита от попадане на метални йони в суспензията е осигурена чрез използване на реакторни съдове от боросиликатно стъкло. Геометрията на съдовете и бъркалките е проектирана така, че да липсват „мъртви зони“ и да се гарантира избягването на спластяване и натрупване на материал.



Фиг. 1. Концептуална схема на проектираната инсталация за първична обработка

2.3. Методи за аналитичен контрол

За оценка на ефективността на междинните технологични етапи са приложени стандартни и адаптирани физико-химични методи:

- **Определяне на граничното вискозитетно число на целулозата:** чрез използване на вискозиметричен метод и изчисляване на степента на полимеризация (DP).
- **Анализ на химичната чистота:** Определяне на съдържанието на пепел чрез гравиметрични методи, екстрактивни вещества (чрез екстракция с разтворители) и степен на отстраняване на багрилата чрез спектрофотометричен анализ за остатъчни цветни примеси в промивните води.

- **Измерване на pH** чрез потенциометричният метод с лабораторен pH-метър Hanna Instruments HI 2211, оборудван със стъклен електрод и температурна компенсация, подходящ за суспензии.
- **Оценка на структурата и морфологията:** Инструментални анализи на първите образци: оптична микроскопия**, SEM** (морфология на влакната), **EDS** (елементен състав), **ИЧ спектроскопия (FTIR)** (функционални групи / структура) и **ДТА** (термично поведение) [10, 11].

3. Резултати и обсъждане

В настоящия етап от изпълнението на проекта са получени първоначални експериментални данни, които предоставят ценна информация за валидността на заложената концепция при предварителната обработка на отпадъчен памучен текстил. Резултатите могат да се асоциират към основните технологични модули на пилотната инсталация.

3.1. Ефект на механичното раздробяване и развлакняване

Конструираният малогабаритен шредер е подложен на изпитания с цел определяне на оптималните параметри за рязане и развлакняване на изходния текстил. Установено е, че:

- Първоначалното нарязване на отпадния текстилен материал зависи както от скоростта на подаване на суровината във входния бункер, така и от скоростта на въртене на вала с режещите ножове. Чрез регулиране на тези два параметъра е постигната стабилна работа на модула без задръстване и неравномерности на изхода му.
- Етапът на вторична механична обработка, конструктивно свързан директно с изхода на модула за раздробяване, води до значително увеличаване на специфичната повърхност на материала и разрушаване на сплъстените структури, което е от критично значение за последващия масообмен.
- Междинният продукт, получаван на изхода на комбинирания шредерен модул, притежава необходимите физико-механични характеристики за следващия етап на обработка в реакторния блок на инсталацията.



Фиг. 2. Отпадъчен памучен текстил



Фиг. 3. Получен развлакнен целулозен продукт

3.2. Физико-химично пречистване и отстраняване на примеси

Експериментално получените данни от алкалната обработка и избелването в пилотния реакторен блок са съпоставени с утвърдените референтни стойности от световната практика при преработка на памучен отпадък [12, 13]:

Параметри на алкалната обработка:

- *Референтни рамки:* Хидромодул **1:10–1:20**, съдържание на NaOH **3–5 wt%**, температура **85–95°C**, време **90–120 min** [12].
- *Експериментално получени данни:* Хидромодул **1:20**, температура **90°C**, време **90 min** и концентрация на NaOH 5**%**. Постигнато е ефективно екстрахиране и разтваряне на нецелулозни компоненти (липиди, багрила и апретури).

Динамика на промиване и спектрофотометрия:

- *Референтен стойности:* Абсорбция на промивните води A ≤ 0.05 (при λ_{max} за съответното багрило) за потвърждение на пълното измиване на реагентите [13].

- *Експериментално получени данни:* Спектрофотометричният анализ потвърждава, че след 3 промивни цикъла остатъчната концентрация на багрила и алкални агенти пада под границата на детекция, като равновесното pH достига стойности от **7.0–7.5** (при целево референтно pH **6.5–7.5** за суровина за нитриране).

Степен на полимеризация (DP) и състояние на целулозните макромолекули:

- *Работен критерий:* Граничното вискозитетно число на целулозата се определя в разтвор на куприетилендиамин (CED) съгласно ISO 5351, а вискозиметричната степен на полимеризация (DP) се изчислява чрез изрично посочена корелационна зависимост. За настоящото изследване като целеви интервал за целулозен прекурсор за последващо нитриране е приет DP 800–1200 [6–8].
  Експериментално получени данни: Изчислените стойности на DP попадат в приетия работен интервал **800–1200**, което показва, че при приложената предварителна обработка не е настъпило прекомерно скъсяване на целулозните макромолекули. Този резултат сам по себе си не доказва запазване на надмолекулната структура; оценката на кристалинността, ориентацията и морфологията изисква допълнителни структурни и морфологични анализи.

3.3. Оценка на целулозния полуфабрикат като прекурсор за нитриране

Получените до момента образци от развлакнен и пречистен целулозен полуфабрикат имат необходимите физико-механични характеристики за подлагане на нитриране (Фиг. 3). Предстои пълен цикъл от инструментални изследвания на образците (включително бъдещ сравнителен анализ на реакционната способност спрямо изходния текстил), който ще даде ясна представа за реалната ефективност на инсталацията за предварителна обработка на отпадъчен текстил. Реална оценка за пригодността на получавания прекурсор за нитриране ще бъде направена след провеждане на планираните комплексни лабораторни анализи.

4. Заключение

Въз основа на първоначалните резултати от експлоатацията на пилотната инсталация за предварителна преработка на отпадъчен памучен текстил могат да се формулират следните изводи:

1. Междинните експериментални резултати подкрепят приложимостта на заложената технологична схема.

2. Установени са следните основни проблеми:
   - неравномерно развлакняване и наличие на микроагломерати в полуфабриката, установени чрез SEM;
   - необходимост от съчетаване на химична устойчивост и механична здравина на реакторните съдове;
   - загуба на фини влакна при многократното промиване;
   - затруднен надежден контрол на pH в гелообразната реакционна маса;
   - риск от роговеене (hornification) на влакната при неподходящи режими на сушене.

3. Предстоящи задачи за оптимизация:
   - прецизиране на конструктивните параметри на шредера, включително роторния просвет; оптимизиране на хидродинамиката в реакторния блок за подобряване на масообмена; и усъвършенстване на режимите на сушене за получаване на стабилна и хомогенна суровина за последващи опити по нитриране;
   - оптимизиране на енергийните и материалните потоци с цел намаляване на водния отпечатък и разхода на реагенти;
   - провеждане на серии от опити по нитриране на полуфабриката за окончателно валидиране на технологичните параметри в полупромишлени условия.

Благодарности

Тази работа е подкрепена от Научноизследователския сектор (НИС) на Химикотехнологичния и металургичен университет (ХТМУ), София, България, по проект № 59-27 „Разработване на експериментална технология за първична преработка на суровини на целулозна основа от алтернативни източници за производство на високоенергийни азотсъдържащи съединения“.

Литература:

1. Reversing direction in the used clothing crisis: Global, European and Chilean perspectives, 2024 United Nations, ECE/TRADE/484 LC/TS.2024/52, eISBN 978-92-1-106514-5
2. Sara Johnson et al., Supply Chain of Waste Cotton Recycling and Reuse: A Review, AATCC Journal of Research, Vol. 7, No. Special Issue One, Sustainability 2020, DOI: 10.14504/ajr.7.S1.3
3. Birgit Stubbe et al., White Paper on Textile Fibre Recycling Technologies., Sustainability 2024, 16, 618. https://doi.org/10.3390/su16020618
4. M. Bilal, Z. Wang, J. Cui, L. F. R. Ferreira, R. N. Bharagava, H. M.N. Iqbal, Environmental impact of lignocellulosic wastes and their effective exploitation as smart carriers – A drive towards greener and eco-friendlier biocatalytic systems, Science of The Total Environment, 2020, 722, 137903.
5. V. A. Lipin, I. I. Petrova, and E. D. Sofronova, Alternative feedstock for producing nitrocellulose, Fibre Chemistry, Vol. 52, No. 3, September, 2020.
6. Josmi John et al., Nitrocellulose Unveiled: A Brief Exploration of Recent Research Progress, Sustainable Chemical Engineering, Volume 5 Issue 1|2024| 147.
7. Edmund Morris et al., Towards understanding and directing the nitration of cellulose, Cellulose (2025) 32:1513–1526 https://doi.org/10.1007/s10570-024-06298-6
8. Raden Reza Rizkiansyah et al., Selecting appropriate cellulose morphology to enhance the nitrogen content of nitrocellulose, RSC Adv., 2024, 14,28260–28271.
9. Mustafa Dolaz, Cellulose Obtained from Textile Waste Called “Air Condition Dust”: Synthesis and Characterization of Nitrocellulose, Journal of Engineering Sciences December 2016
10. Edmund Morris, Colin R. Pulham, Carole A. Morrison; Structure and properties of nitrocellulose: approaching 200 years of research. *RSC Adv.* 2023; 13 (46): 32321–32333. https://doi.org/10.1039/d3ra05457h
11. Yanhua Liu et al., System and Method for Simultaneous Measurement of Nitrogen Content and Uniformity of Nitration of Nitrocellulose, Cent. Eur. J. Energ. Mater. 2018, 15(4): 554-571; DOI: 10.22211/cejem/93601
12. Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), pp. 3358–3393.
13. Miles, F. D. (1955). *Cellulose Nitrate: The Physical Chemistry of Nitrocellulose, its Formation and Use*. London: Oliver & Boyd.
14. ISO 5351:2010. Pulps – Determination of limiting viscosity number in cupriethylenediamine (CED) solution. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

APPLICATION OF CONDITIONAL AND UNCONDITIONAL TERMS OF CONSTRUCTION PRODUCTS

Nadya Marinova

New Bulgarian University – Sofia
e-mail: nmarinova@nbu.bg

Keywords: *real options, binomial model, investment projects, construction products, conditional and unconditional contracts*

Abstract: *The use of real options for evaluating investment activity in the implementation of construction projects has its specific features and parameters, as well as some limitations, but at the same time – and the possibility of using this approach as a complement to traditional dynamic models. This allows for making flexible investment decisions in conditions of uncertainty and ambiguity. The approach to real options in construction projects provides an opportunity for choice, but not an obligation to take specific investment actions.*

The binomial model for evaluating real options in construction projects, through options for determining the value of options, shows that the application of option theory in making decisions about the implementation of investment projects makes it possible to evaluate and justify investment costs.

This article is aimed at examining the possibilities for applying conditional and unconditional term contracts in the implementation of construction products, through real examples from practice. The aim is to deduce the advantages of applying option theory to evaluate real options in construction projects in order to determine the extent to which the investment is appropriate.

The main conclusions in the article are made on the basis of a review of relevant sources on the researched issues, a study of international practice, as well as the author's personal applications of option theory and, more specifically, practical applications of the theory for evaluating real options in construction projects.

ПРИЛОЖЕНИЕ НА УСЛОВНИ И БЕЗУСЛОВНИ СРОЧНИ ДОГОВОРИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИЯТА НА СТРОИТЕЛНИ ПРОДУКТИ

Надя Маринова

Нов български университет – София
e-mail: nmarinova@nbu.bg

Ключови думи: *реални опции, биномиален модел, инвестиционни проекти, строителни продукти, условни и безусловни договори*

Резюме: *Използването на реални опции за оценка на инвестиционната дейност при реализацията на строителни проекти има своите специфични характеристики и параметри, както и определени ограничения. Същевременно този подход може да се използва като допълнение към традиционните динамични модели. Това позволява вземането на гъвкави инвестиционни решения в условията на несигурност и неопределеност. Подходът на реалните опции при строителните проекти предоставя право, но не и задължение за предприемане на конкретни инвестиционни действия.*

Биномиалният модел за оценка на реални опции в строителните проекти позволява определянето на стойността на опциите и показва, че прилагането на опционната теория при вземането на решения за реализация на инвестиционни проекти дава възможност за оценяване и обосноваване на инвестиционните разходи.

Настоящата статия разглежда възможностите за прилагане на условни и безусловни срочни договори при реализацията на строителни продукти чрез конкретни примери от практиката. Целта е да се изведат предимствата на опционната теория при оценяването на реални опции в строителни проекти, за да се определи доколко инвестицията е целесъобразна.

Основните изводи в статията са направени въз основа на преглед на релевантни източници по изследваната проблематика, проучване на международната практика, както и на личния опит на автора в прилагането на опционната теория и по-конкретно – в практическото ѝ използване за оценяване на реални опции в строителни проекти.

Introduction

Today, more and more organizations are approaching effective management of opportunities in the implementation of investment projects, applying the idea of moving from a limited focus on risk as a threat to the management of those of its sources that can lead to positive impacts and opportunities, in order to get the most out of the overall risk management of the investment project. At the corporate level, organizations are required to create and maintain investment opportunities that are aligned with both their potential and their need for growth, but also with taking on appropriate levels of risk in order to grow. At the same time, in order to build a secure and working strategy, options are needed that facilitate the maintenance of a portfolio of investment opportunities (from low risk, low return to higher risk and higher return) depending on the forms of investment and the potential of the organizations.

Specialized literature indicates that the value of each asset represents the present value of the cash flows expected from this asset. If assets are attributed two specific characteristics, this basic rule would have an exception. These characteristics are related to the fact that: (1) assets derive their value from the values of other assets and (2) the cash flows on assets depend on the occurrence of specific events (Rau, R., 2016).

The specified assets are called “options”, and it is characteristic of them that the present value of the expected cash flows from these assets will underestimate their true value. In the focus of investment project management, it is important to determine and analyze the characteristics of the cash flow of options, to consider the factors that determine their value and to explore the possibilities of how and in what way they can be best valued.

From this perspective, the purpose of this article is to present what are the possibilities for the application of conditional and unconditional term contracts in the realization of construction products. By providing real examples from the practice of construction businesses, the presentation attempts to show the advantages of applying option theory to the evaluation of real options in construction projects.

Statement

1. Fundamentals of Option Pricing

The theoretical framework for option pricing is that “options” give the holder the right to sell or buy a given quantity of an underlying asset at a fixed price (“strike price” or “exercise price”) on or before the date the option expires (Rau, R., 2016, p. 98). Another definition states that options are the right over another asset, other right or economic element, with an option giving the holder the right to buy or sell a specific asset at a price previously agreed upon between the issuer and the holder of the option (Prodanov, St., 2009, p. 369).

Since this is a right, not an obligation, the holder can choose not to exercise the right and let the option expire. According to the specialized literature, there are two types of options (Prodanov, St., 2009, pp. 369–370):

- A call option is called a “call option”. It is similar to a “long” position, as it gives the holder the right to buy an asset (real, financial) at its exercise price (fixed). This happens on a date that is determined in advance.
- A put option is called a “sell option”. It is similar to a “short” position, as it gives the holder the right to sell an asset (real, financial) at its exercise price (fixed). This also happens on a date that is determined in advance.
- A call option gives the right to buy the underlying asset at the exercise price. This can happen at any time before the option expires. The buyer pays a price for this right. If at the expiration of the option, the value of the asset is less than the strike price, the option is not exercised and expires worthless. On the other hand, if the value of the asset is greater than the strike price, the option is exercised – the buyer of the option buys the asset at the strike price. The difference between the value of the assets and the strike price includes the gross profit from the option investment. The net profit from the investment is the difference between the gross profit and the original price paid for the call option.
- A put option gives the buyer of the option the right to sell the underlying asset at a fixed price at any time before the expiration date of the option. The buyer pays a price for this right. If the price of the underlying asset is higher than the strike price, the option will not be exercised and will expire worthless. On the other hand, if the price of the underlying asset is lower than the strike price, the owner of the put option will exercise the option and sell the stock at the strike price, receiving the difference between the strike price and the market value of the asset as gross profit. Again, netting out the initial costs paid for the put option gives the net profit. A put option has a negative net profit if the value of the underlying asset exceeds the strike price,

and a gross profit equal to the difference between the strike price and the value of the underlying asset if the value of the asset is less than the strike price.

- Another traditional form of options should be mentioned, known as a "double option", although it is less commonly used. It gives the holder the right to buy or sell a real or financial asset at the price of its exercise. This again happens on a date that is determined in advance. It is important to note that the two rights (to buy or sell) are not given simultaneously. This type of options is characteristic mostly when unlisted commodity options are traded, as the exercise of the call option leads to the expiration of the put option, and the exercise of the put option – to the expiration of the call option, respectively (Prodanov, St., 2009, p. 370).

2. Determinants of the value of the option

The value of a given option is determined by a number of variables related to the underlying asset and the financial markets. The following are the determinants of the option value (Rau, R., 2016):

1. ***The current value of the underlying asset***: options are assets that derive value from the underlying asset. Therefore, changes in the value of the underlying asset affect the value of options for that asset. Since call options provide the right to buy the underlying asset at a fixed price, an increase in the value of the asset will increase the value of the call option. Put options, on the other hand, become less valuable as the value of the asset increases.
2. ***Difference in the value of the underlying asset***: the buyer of an option acquires the right to buy or sell the underlying asset at a fixed price. The greater the variance in the value of the underlying asset, the greater the value of the option. This applies to both call and put options. However, it should be borne in mind here that higher variance can reduce the value of the underlying asset. The further a call option enters the profit zone, the more it resembles the underlying asset itself. For call options that are deeper in the profit zone, higher variance can reduce the option's value. Although it may seem counterintuitive at first glance that increasing the measure of risk (variance) should increase value, options are different from other securities in that option buyers can never lose more than the price they pay for them; in fact, they have the potential to make significant profits from large price movements.
3. ***Dividend payments on the underlying asset***: The value of the underlying asset can be expected to decrease if dividends are paid during the life of the option on it. As a result, the value of a call option on that asset is a decreasing function of the amount of expected dividend payments, while the value of a put option is an increasing function of expected dividends. There is another way to understand the effect of dividend payments on call options – they represent a cost of postponing the exercise of the option when it is in the profit zone. To better understand this, an example can be given with an option on a traded stock. Once the call option moves into the profit zone, i.e. its holder would make a profit upon exercising it, exercising the option will provide the investor with the stock itself and the right to receive dividends from it in subsequent periods. If the option is not exercised, these dividends will be lost.
4. ***Strike price of the option*****:** one of the key characteristics used to describe an option is its strike price. In the case of call options, where the holder acquires the right to buy at a fixed price, the value of the option decreases as the strike price increases. In the case of put options, where the holder has the right to sell at a fixed price, the value of the option increases as the strike price increases.
5. ***Time to expiration***: Both call and put options become more valuable as the time to expiration increases. This is because a longer period allows more time for the value of the underlying asset to change, which increases the value of both types of options. Furthermore, in the case of a call option, where the buyer must pay a fixed price at expiration, the present value of this fixed price decreases as the life of the option increases, which increases its value.
6. ***The risk-free interest rate corresponding to the term of the option***: Since the buyer of an option pays its price in advance, an opportunity cost (opportunity cost) arises. This cost depends on the level of interest rates and the time to expiration of the option. The risk-free interest rate also plays a role in the valuation of options, since the calculation of the present value of the exercise price takes into account that this price must be paid (in the case of call options) or received (in the case of put options) only at expiration. An increase in interest rates increases the value of call options and decreases the value of put options.

It is pointed out that the relationship between the price of the underlying asset and the profit or loss when issuing call and put options at the expiration date is opposite: other things being equal, the loss on call options is not limited, and its size coincides with that of the profit of the option buyer; the profit on put options is limited to the option price, and the loss – to the minimum price of the underlying asset (in the most pessimistic version, this loss is equal to zero) (Prodanov, St., 2009, p. 372).

The right of the owner for a certain period of time, which gives the call option, is associated with the payment of the exercise price, and in return he receives an asset with a certain value. It should be noted that the exercise of the call option is irreversible. Although investors can sell the asset

to other investors, they cannot recover the option or the money they paid for it to exercise it. Similarly, a company that has an investment opportunity has the option to spend money (the exercise price) now or in the future in exchange for an asset (e.g., a project) of some value. Again, it can sell the asset to another company, but it cannot get its investment back.

As with financial options, a call option to invest in real assets is valuable because of the potential for increasing net profit if the value of the asset increases. If the value of the asset decreases, the company does not have to invest and will lose only what it spent to obtain the investment opportunity. Large corporations usually obtain investment opportunities through patents, land ownership, or natural resources. In a general sense, they arise from the company's managerial resources, technological expertise, reputation, market position, and possibly scale, which allow the company to undertake investments that individuals or other firms could not undertake.

Recent studies have shown that the opportunity costs of investing can be large and investment rules that ignore them can be wrong (Reside, R., 2022). In addition, the opportunity costs of investing are highly sensitive to the future value of the investment project, so changing economic conditions affecting the perceived risk of future cash flows can have a large impact on investment costs.

3. Application of conditional and unconditional forward contracts in the realization of construction products – real examples from practice

The above statement made it clear that, like financial options, real options also give the right to "buy" or "sell", i.e. to continue an investment activity or to terminate it. At the same time, the valuation of real options is analogous to the valuation of financial options, although there are some differences between them. The analogy is usually associated with the parameters for evaluating options in the Black-Scholes model with the parameters for evaluating real options. In many cases, the differences between financial and real options are not discussed in depth and do not reflect the practical problems of valuing real options.

In practice, for example, the values of financial options are not negative, while some real options may have negative values for the underlying asset. If the valuation does not take this into account, the applied method gives strange and misleading results. Another reason for the difference is that information about financial options is available in all markets. This is not the case for real options, and this ambiguity must be taken into account both in the valuation in real conditions and in the analysis of the results. In addition, the length of the investment periods is usually very different. As a result, uncertainty changes (usually decreases) during the investment in real options.

Another common problem is that real options valuation models are complex to use and difficult to explain, especially without serious specialist training (Triantis, A., 2005). Real options are often analyzed through the prism of financial options and to be justified by an equivalent portfolio or a risk assessment approach in a neutral market. In practice, both approaches require information about the underlying asset and its parameters for a given market.

Increasingly, the requirement that input data be based on market conditions is required in practice, and real options are accepted as a way to apply the binomial model. Analyses show that the requirements for the valuation of financial options and real options are met by assessing the results of the net present value (NPV) for comparable investments. In this regard, real options are considered as a complement, not a substitute, in the calculation of discounted cash flows, which is a positive point in their application (Woolley, S., F. Cannizzo, 2005).

The results obtained for the real options are subjected to detailed analysis in order to make the right management decisions. In addition, when it comes to investment projects, the evaluation of patents and technologies is mandatory. This is essentially a difficult task, because the types of uncertainty exclude the possibility of precise evaluation results.

Some main differences between financial and real options in the implementation of investment projects in construction are presented below depending on:

First – type of assets:

- Financial options refer to financial assets that have well-defined market prices and can be traded on financial markets. They have a real market value that is easily accessible and measurable;
- Real options refer to physical assets or investment projects (for example, construction sites), the value of which depends on future market conditions. They cannot be easily traded on markets and are often valued based on market forecasts.

Second – access to information:

- Financial options have clear and publicly available data about their parameters (prices, liquidity, volatility, etc.), which can be used to accurately and precisely calculate their value;

- Real options often lack accessible information, and their valuation is based on forecasts and modeling of future market conditions, which introduces uncertainty, increases the difficulty of their valuation and requires careful risk management.

Third – future forecasts:

- Financial options are based on financial assets with predictable risks and returns, which facilitates their evaluation with mathematical models;
- Real options have greater uncertainty and complexity in terms of future forecasts, especially in the context of investment projects in construction, where many factors operate (market conditions, regulations, technological innovations).

Fourth – duration of the investment period:

- Financial options usually have shorter execution periods, as the terms for exercising the options can be from a few days to months;
- Real options in construction involve longer investment periods (years), as uncertainty and market conditions during these longer periods change enormously (usually decrease).

Fifth – accuracy of assessment:

- Financial options have a more precise and reliable measurement of value thanks to the available data, the stability of the markets and shorter execution periods;
- Real options are often more vague and less precise because they involve higher levels of uncertainty that are difficult to predict or quantify. Estimates depend heavily on the quality of the forecasts and data used.

Sixth – risk assessment and management:

- Financial options require the use of strict assumptions of risk neutrality and rational market behavior;
- Real options cannot always be valued under these assumptions, as their value and applicability often depend on strategic thinking that is less related to purely financial valuations. Risk in real options is assessed and managed differently (for example, by hedging or transferring risk to partners such as real estate agencies).

Real options are not hedged in the same way as financial options, as this requires specific information about the underlying asset and the state of the market. They do not have fixed and easily measurable payment functions, as in financial options. In addition, financial options are mainly used in liquid and stable markets, where assets are standardized. Real options are mainly used in areas with long-term and capital investments, such as construction, where there is a certain uncertainty and longer investment periods. They are used as part of the strategic planning of investment projects, which allows flexibility in decision-making and adaptation to changing conditions.

It can be summarized that the main difference between financial and real options in the construction sector is related to the specificity of the assets, market information, the complexity and uncertainty of the valuation, as well as the length of the investment period. While financial options are more precise and easily applicable in regulated markets, real options offer strategic flexibility in conditions of high uncertainty and long-term investments in construction.

The described differences between financial and real options in construction investment projects emphasize the importance and role of company management in making investment decisions under conditions of uncertainty. While financial options are standard and tradable, real options provide the opportunity to adapt investments to changing market conditions. This adaptability makes real options a valuable tool for managing construction projects, including risk management, allowing companies to control and minimize it. In this context, the different types of real options also play a specific role in the investment planning process. They provide construction companies with options to postpone, expand, cancel or modify the project, which allows for better management of uncertainty. The main types of real options that can be applied in construction, as well as their importance for the investment process, can be distinguished as follows (Urvashi, V., 2011):

- Option to defer/postpone – the company postpones the implementation of its investment intentions until market uncertainty decreases and more information is available for decision-making. This type of option is useful when capital expenditures are significant;
- Option to abandon/exit option – the company abandons the project in order to reduce its losses in the event of a significant deterioration in market conditions. This type of option is applied when there is an opportunity to redirect resources or sell assets;
- Option to contract/divestiture option – the company sells a share of its business or has the opportunity to reduce the scale of its activities, especially in unfavorable market conditions for

it. This type of option is applied in connection with risk management, as it provides an opportunity to provide more flexibility;

- Option to expand – the company increases its scale or has the opportunity to invest further when market conditions are favorable for it.

Of the existing combined models of real options, the specialized literature pays most attention to (Lee, Meng-Yu, et al., 2006):

- Switching options – the company has the opportunity to change the scale of its production or to use various technological innovations quite flexibly, depending on market conditions. Such types of combined options are usually used by sectors that are characterized by stronger dynamics and higher risk;
- Compound options/sequential options – companies apply them in the implementation of projects consisting of several interconnected stages. In this way, each decision that follows depends on and is tied to the goals and results achieved in the previous stage. Accordingly, the company analyzes the completion of each stage and decides whether to continue or terminate the project.

These models are used to evaluate investment projects in construction, industry, high-tech industries and the pharmaceutical sector, where uncertainty is high and strategic flexibility is a key factor for success.

The analysis of the main features in the application of real options for risk management within conditional and unconditional term contracts requires a comparison of the expected profit of the construction company in different future states of the real estate market depending on the type of contract concluded.

Let us assume that the value of the real option is 1,500 EUR/m², and a real estate agency offers a price of 1,455 EUR/m² for concluding an unconditional term contract (forward). In this case, the profit of the construction company is fixed and does not depend on the dynamics of the market. It is assumed that the company's profit per square meter is 160 EUR, and the developed built-up area (GFA) amounts to 1,860 m².

Therefore, the total profit of the construction company will be:

1,860 * 160 = 297,600 EUR

When concluding an unconditional fixed-term contract, the construction company guarantees a gross profit (before taxes) of 297,600 EUR.

However, if the company chooses a real option, it reserves the right to fulfill or not fulfill the terms of the contract depending on the state of the housing market. In the event of an increase in housing prices, the construction company will prefer to sell on the open market, while in unfavorable conditions it will choose to exercise the real option.

In an optimistic market scenario, the expected profit of the construction company per square meter will be:

$Ca = 1.460 - 1.295 = 165$ EUR/m²

In a pessimistic market scenario, the profit from exercising the real option will be minimal:

$Cb = 1.320 - 1.295 = 25$ EUR/m²

From this, the following conclusions can be drawn:

- In an optimistic scenario, concluding a real option contract means a higher profit for the construction company compared to the risk-free profit guaranteed by the unconditional forward contract. Therefore, the price of the real option contract would be higher than that of the unconditional contract, while at the same time the risk is lower.
- In a pessimistic scenario, the profit from a real option contract would be lower than that of the unconditional contract. Therefore, the fixed price of the forward contract provides greater security for the construction company.

Risk management can be carried out through three main approaches:

1. Refusal to conclude a contract, in which all uncertainty related to price changes is fully borne by the construction company;
2. Conclusion of an unconditional fixed-term contract, providing a fixed return, regardless of market conditions;
3. Use of a real option or a conditional fixed-term contract, which allow for flexibility in adverse market changes.

The analysis of the results reveals different options for management decisions for the construction company's management team:

- First, if the company assumes all the risk without concluding preliminary contracts, with an increase in prices on the real estate market, the expected profit of 165 EUR/m² will be maximum.
- Second, the construction company is faced with the choice between the two types of fixed-term contracts. In this case, the unconditional fixed-term contract guarantees a fixed profit of 160 EUR/m², which is higher compared to the profit when using a real option in conditions of a pessimistic scenario of housing market development (25 EUR/m²).

When concluding a real option contract and the presence of favorable market conditions, the expected profit from the option will amount to 165 EUR/m², which makes it higher compared to the unconditional contract providing 160 EUR/m². On the other hand, the unconditional fixed-term contract will provide higher protection in the event of negative developments in the housing industry. In this case, the real option contract will provide better opportunities in the event of an increase in prices in housing construction. Both approaches carry risk, therefore the final choice depends on the expectations of the management team regarding future market dynamics.

In this case, it is important to compare the total investment for the acquisition and renovation of the housing (2,328,000 EUR) and the expected profit that can be realized by concluding term contracts at different future market prices per square meter.

In order to assess the impact of risk and a strategy for its management, we determine the revenue of the construction company from the sale of the housing. This is the sum of the costs of purchasing the buildings, repairing the housing and the profit per m², that will be realized upon sale. With this information, the management team will decide on the best option for risk management when implementing investment projects in construction.

Table 1. Revenue from operations and profit of the construction company under different hypotheses for the state of the housing market in one year (euro/m²)

Hypotheses about the state of the housing market in a year	**Own risk**	**Unconditional contract**	**Real option**
Optimistic			
• revenue growth	1,600	1,455	1,460
• profit	305	160	165
Realistic			
• average revenue	1,360	1,455	1,390
• average profit	165	160	95
Pessimistic			
• revenue decline	1,320	1,455	1,321
• profit decline	25	160	25
Option value	**-**	1,455	1,500
Maximum contract value	**-**	1,547	1,547

Table 1 presents the results of the calculations for making management decisions and various strategy options for the construction company. The results for the realistic variant of the hypothesis for the state of the housing construction market within the next year are determined as average values of the results for the optimistic and pessimistic hypotheses. In possible variants for the next one-year period, however, they may fluctuate within about +5% to -5% of the calculations made at the present time.

As for the other data (Tab. 1), when pessimistic market conditions arise, the profit for an unconditional fixed-term contract increases by more than six times compared to the risk for own account. At the same time, the revenue from the sale of a square meter when concluding an unconditional contract (under the same market conditions) increases the income by only 10.2%. Similar conclusions can be drawn for the other contract variants, with different levels of risk leading to different financial results.

The example under consideration illustrates protective strategies when making risky decisions. Thus, the propensity of management teams to take or avoid risk varies depending on the specific economic conditions, which in turn leads to the choice of different strategies. In one of the cases, the information shows a reason for the construction company to take risk on its own account, without the need to negotiate with a real estate agency. At the same time, the results support the choice of an unconditional fixed-term contract in a negative (pessimistic) market situation, as this would allow for a partial transfer of the risk to the real estate agency in cases of price changes.

In conclusion, it can be stated that the choice of an appropriate strategy will depend on several significant factors:

- Amount of expected profit;
- Amount of total revenue;
- Value of investment costs;
- Value of realized revenue;
- Whether the investment projects under consideration are part of a larger business or stand-alone;
- Strategic, economic and social significance of the investment projects;
- Propensity to take or avoid risk;
- Expectations of owners, investors, managers for the future development of the business.

Based on these factors, the final decision to conclude conditional or unconditional fixed-term contracts should be made after careful analysis and consideration of the specified circumstances.

In conclusion, it can be summarized that the use of real options for assessing investment activity in the implementation of construction projects has its specific features and parameters, as well as some limitations, but at the same time – and the possibility of using this approach as a complement to traditional dynamic models. This allows for flexible investment decisions to be made in conditions of uncertainty and ambiguity. The approach to real options in construction projects provides an opportunity for choice, but not an obligation to take specific investment actions. Traditionally, investments for the development of a given industry or business are based on the analysis of the net present (current) value, and the assessment of investment projects through real options is this additional perspective through which the activities of the investment can be assessed in a different way.

At the same time, the shortcomings and negatives in the application of the real options approach are dictated by possible limitations and assumptions related to the collection of new information, costs, market conditions and changes in them, etc. In the application of option contracts for the implementation of construction projects, some of the shortcomings can be mitigated by using more conservative estimates, which, although they reduce the value of the option, can justify the implementation of the project in the event of a positive result. Another approach used in practice is the scenario approach, which shows possible options in conditions of positive (optimistic) or negative (pessimistic) market conditions.

Conclusion

As a result of the issues considered and the presented real examples from the practice in construction for the application of conditional and unconditional term contracts in the realization of construction products, as well as in accordance with the goal set for this article, the following conclusions and inferences can be drawn:

First. In the modern corporate environment, option theory provides new opportunities for managing investment projects, allowing for risk assessment and flexible adaptation to market conditions. Since this is a right, not an obligation, the holder can choose not to exercise his right and let the option expire.

Second. Option contracts can be conditional or unconditional, with conditional ones providing flexibility in investment decisions, while unconditional ones commit the parties to certain obligations.

Third. Real options play a key role in investment projects, as they enable strategic planning and management flexibility in the face of changes in the economic and market environment. Binomial models are effective for valuing risky assets in construction projects, as they offer a flexible approach to modeling uncertainty and making investment decisions.

Fourth. The use of term contracts in construction projects contributes to better risk management by allowing the transfer of part of the uncertainty to third parties through various option strategies.

Fifth. Option methods provide a competitive advantage in project management by enabling dynamic adaptation to market conditions and optimizing the value of investments.

In conclusion, it can be added that models for valuing real options in construction projects, through options for determining the value of options (equivalent portfolio, real option, unconditional term contract) show that the application of option theory in decision-making for the implementation of investment projects makes it possible to assess and justify investment costs. The advantage of applying option theory to assess real options in construction projects is that even at the initial stage of forecasting the expected results and benefits, it is possible to determine the feasibility of the investment, by examining the possibilities for its postponement, modification or termination. This allows flexibility in making decisions about project implementation (unlike the analysis of the net present value).

References:

1. Lee, Meng-Yu, et al. (2006). The Sequential Compound Option Pricing with Random Interest Rate and Application to Project Valuation. Proceedings of the 9th Joint Conference on Information Sciences, JCIS, doi: 10.2991/jcis.2006.98.
2. Rau, R. (2016). Option Pricing Theoryand Models. In: Short Introduction to Corporate Finance (pp. 98–125). Cambridge Short Introductions to Management. Short Introduction to Corporate Finance: Cambridge University Press, doi: https://doi.org/10.1017/9781316105795.006.
3. Reside, R. (2022). Real options: A review of select theories and applications, UPSE Discussion Paper, No. 2022-02, University of the Philippines, School of Economics(UPSE), Quezon City, doi: https://hdl.handle.net/10419/266064
4. Prodanov, St. (2009). Options - an instrument of investment in securities. In: V. Adamov, St. Prodanov. Investments (pp. 369–382). Svishtov, Al "Tsenov".
5. Triantis, A. (2005). Realizing the potential of real options: does theory meet practice? Journal of Applied Corporate Finance, 17(2), 8–16, doi: https://doi.org/10.1111/j.1745-6622.2005.00028.x
6. Urvashi, V. (2011). A Review of Real Option Practices Followed by Corporate for Expansion and Deferral Decision. The IUP Journal of Financial Risk Management, Vol.VIII, No.1, 7–22, doi: https://ssrn.com/abstract=1869863
7. Woolley, S., F. Cannizzo (2005). Taking Real Options Beyond the Black Box. Journal of Applied Corporate Finance, 17(2), 94-98, doi: 10.1111/j.1745-6622.2005.00036.x.

MODERN CONCEPTS OF CORPORATE RISK MANAGEMENT IN INVESTMENT PROJECTS

Nadya Marinova

New Bulgarian University – Sofia
e-mail: nmarinova@nbu.bg

Keywords: *corporate risk, investment projects, corporate governance*

Abstract: *Corporate risk management policy should be considered at the very beginning of the creation and emergence of organizations. The key to the basic principles for ensuring effective corporate risk management are the analysis of the current economic situation and the possibility of using tools for forecasting and modeling scenarios for further development.*

This article examines how decisions are made and how management itself is carried out at the corporate level, focusing on corporate risks related to the implementation of investment projects in corporations and the ways in which they are managed in investment projects.

The main conclusions in the article are made based on a review of relevant sources on the topic, a study of international practice, as well as the author's personal observations, through the derived own proposals for corporate risk management in investment projects.

СЪВРЕМЕННИ КОНЦЕПЦИИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА КОРПОРАТИВНИЯ РИСК ПРИ ИНВЕСТИЦИОННИ ПРОЕКТИ

Надя Маринова

Нов български университет – София
e-mail: nmarinova@nbu.bg

Ключови думи: *корпоративен риск, инвестиционни проекти, корпоративно управление*

Резюме: *Политиката за управление на корпоративния риск следва да бъде разглеждана още в самото начало на създаването и възникването на организациите. Ключово значение за основните принципи за осигуряване на ефективно управление на корпоративния риск имат анализът на текущата икономическа ситуация и възможността за използване на инструменти за прогнозиране и моделиране на сценарии за бъдещо развитие.*

Настоящата статия разглежда начина, по който се вземат решения и се осъществява самото управление на корпоративно равнище, с акцент върху корпоративните рискове, свързани с реализацията на инвестиционни проекти в корпорациите, както и върху начините за тяхното управление в рамките на инвестиционните проекти.

Основните изводи в статията са направени въз основа на преглед на релевантни източници по темата, проучване на международната практика, както и на личните наблюдения на автора, чрез които са изведени собствени предложения за управление на корпоративния риск при инвестиционни проекти.

Introduction

The modern definition links “corporate governance” to the relationships between shareholders, the board of directors, shareholders, managers and all stakeholders in the organization, determining how management and control are carried out. The presence of a framework to effectively implement governance in corporations is determined by the fact that companies that are well managed are characterized by a greater competitive advantage, more sustainability and the achievement of high results and goals in the long term.

At the same time, the essence of the concept of risk management is considered as a set of strategic actions to optimize the activities of the functional units of the enterprise to minimize the occurrence of negative financial or strategic consequences for the enterprise (Annamalah, S., et al., 2018).

According to others, risk management is a comprehensive means of using structural units and financial assets to maintain the viability of the enterprise and its competitiveness in the selected segment of its activity (Abideen, A., F. Mohamad, Y. Fernando, 2020).

From this position, the main goal of this article is to present and analyze how corporate risks related to the implementation of investment projects in corporations are affected and how they are managed in investment projects.

Statement

1. Nature and characteristics of corporate risks

The concept of “risk” (from Latin danger, uncertainty) is a decision, undertaking or action, the outcome of which is unknown. Interpretations of the concept usually consider its negative side, i.e. the occurrence of a negative event, causing losses or damages. There are also sources according to which the concept derives from the Arabic “risq”, which means “everything that is given to you [by God] and from which you derive profit” (Merna, T., F. Al-Thani, 2008, p. 9). Here the term has connotations of a random and favorable outcome.

Positive aspects of risk are also found in its interpretation as an opportunity, a chance. Recently, this area, often referred to as the “appetite” of organizations for risk, has also been studied. By its nature, risk is inevitable. It affects all conscious or unconscious activities of a person, as practically every action or inaction is associated with risk.

The etymology of the concept itself comes from the old Italian "risicare" (to decide, dare, dare), which is more close to some kind of choice and decision-making. The concept of "risk" entered the Bulgarian language through the French "risque" (inappropriate, dangerous, suspicious), therefore, in terms of the semantic meaning of the word, risk is perceived as a likely undesirable event that brings loss or harm. According to the literature, "risk" brings (Mancheva, Zh., 2016, pp. 5–6):

- Possible danger, action of chance, possible loss in a commercial transaction;
- Possible danger, action of chance with hope for success, possible loss in a commercial transaction;
- Danger, riskiness, responsibility;
- Possible danger, possible loss, failure.

The International Organization for Standardization defines the concept of “risk” as “the product of the probability of an event occurring and the impact of the event occurring” (IEC/ISO 31010:2009). The specialized literature provides different definitions of “risk”: some consider it both as a probability of loss and as an opportunity for profit. According to others, risk is only the probability of the occurrence of undesirable events associated with loss. In the context of project management, risk is “a variable in the process of building a project, the change of which leads to uncertainty regarding the final costs, duration and quality of the project” (Mancheva, Zh., 2016, p. 8).

It is observed that the definitions of “risk” are diverse, but also multifaceted. At the same time, some of them do not overlap with others, and the often expressed opposite reasons for its causes can also cause its ineffective management in real practice.

Regardless, risk remains a key category for the measure of danger in given situations where there are potential risk factors that can negatively impact both nature and society, as well as the activities of people and organizations.

At the same time, it is again stated that poorly defined and clear objectives are themselves a source of risk, and the need for a minimum level of achievement of objectives against certain criteria also automatically generates risk under these criteria (Merna, T., F. Al-Thani, 2008, p. 17). If, for example, corporate management sets unattainable objectives for contractors, then it is very likely that projects will fail due to the risk associated with achieving such objectives. Thus, clarifying the objectives and performance criteria that reflect the requirements of different parties, including stakeholders often not recognized as significant (regulatory authorities, for example), should also be taken into account. At the corporate level, an assessment of the dependence between different objectives, strategies and risk management tools is also expected.

Whatever the main objectives for implementation, the focus on the project, its success and the uncertainty of achieving these objectives leads to the definition of risk in terms of a “threat to the success of the project”. For example, if the success of a project, and in turn the success of the manager and his team, is measured solely in terms of the costs incurred, against specific objectives or commitments, then risk can be defined in terms of the threat to success posed by the size of the possible costs and the probability of their being exceeded.

From this perspective, the logical step in the path of impacting risk is to manage it by eliminating or reducing its negative impact. At the corporate level, risk assessment and analysis with a similar focus also shows limited project risk management. Again, it is equally important to "assess and manage the positive side of uncertainty, which may represent an opportunity rather than a threat" (Merna, T., F. Al-Thani, 2008, p. 17). Furthermore, opportunities have a strong significance in terms of trust, integrity and morale – high morale is as important for good risk management as it is for overall project and team management. If the project team works solely and exclusively amidst threats, the project is much more likely to fail.

The systematic search for opportunities and the willingness to respond appropriately to them, identified by everyone at all corporate levels (which can have consequences far beyond the powers of the "discoverer" of the opportunity), can provide a basis for systematically building trust, both horizontal and vertical communication, more cohesion and support.

It is important to assess and analyze a given project risk according to its nature, as it can be both a major threat and an exceptional opportunity with significant consequences (including behavioral) for the project, corporate governance and organizations as a whole.

Traditional definitions of risk and risk management undoubtedly have their value in typical and characteristic conditions, but it is important in specific circumstances in practice that specialists face the complexity of risk in the project, and that management itself focuses on whether and when real results should be achieved, trying to manage each risk-threat and risk-opportunity at each level in the project.

The modern development of "risk" as a broad and multifaceted category is the subject of various sciences and research areas, each of which concentrates its knowledge in specific approaches, methods, tools for its management. Given this, the distribution of risk into specific subcategories is also necessary, i.e. its classification of risk types according to certain characteristics.

In its classification (in terms of possible deviations of the actual from the expected result), the specialized literature distinguishes the most typical risks associated with project management at the corporate level, as follows (Merna, T., F. Al-Thani, 2008, pp. 18-30):

Project risk – most often associated with costs, time, quality and operation; project size, technological maturity, structural complexity of the project;

Financial risk – the maximum point of financial risk is when the project approaches the phase of its completion;

Global risk – defined as uncontrollable; risk that arises from sources external to the project environment; although they are usually predictable, their effect on the outcome may not always be controllable within the main components of the project;

Elementary risk – arises from sources internal to the project environment and is usually controllable within the project elements; there are several basic elementary risks at the corporate level: construction/production, operational, financial and revenue;

Holistic risk – is related to intangible assets (reputation, value, benefits, technology, intellectual property, changes in strategy/methods, sharing and perception of the owner, corporate security, product/service quality);

Static risk – refers only to potential losses, when management is only engaged in minimizing losses by avoiding risk (for example, the risk of losing markets for a particular product or brand, while not risking the introduction of new products in the same market);

Dynamic risk – this risk refers only to maximizing opportunities and means that there will be both potential gains and potential losses; this is the risk of losing something that is certain to be profitable, but at the same time uncertain. In fact, every management decision has an element of dynamic risk, governed only by the practical rules of risk taking. During the execution of a project, the losses and gains resulting from this risk can be set against any other risk and compared;

Inherent risk – this is the way in which risks specific to a particular business and/or industry are managed; the level of attention to inherent risks should be as high as the real inherent risk in the operations that are necessarily carried out in the given industry;

Contingent risk – this is the risk in which a corporation is directly affected by a risk, beyond its direct control, but on which it is dependent;

Customer risk – dependence on a single customer creates vulnerability because that customer may be attracted by a competitor; this risk can pose a serious threat if the organization's customer base is too small;

Regulatory risk – this is the risk that may cause uncertainty in the event of potential (usually legislative) changes;

Reputational risk – at the corporate level, reputational risk is not a risk in itself, but rather a consequence of other risks (fraud, corruption, failure to respond to complaints, neglect of consumers, lack of respect, etc.). The lack of management and control is actually what causes much of the reputational damage, not the occurrence of the risk event itself;

Organizational risk – this risk is related to weak organizational management, failure to respect the reporting hierarchy, especially between different organizational levels, weak control and poor communication, which can have different impacts on the business;

Risk of misinterpretation of information – this risk is related to communications and relationships within an organization – if management and staff in the same organization cannot communicate effectively thanks to their own professional language (jargon). For example, engineers, academics, bankers have their own terms that insurers use, using words with common meanings, but in a special way. Thus, the same terms, even within the same profession, can have different meanings;

IT risk – due to the rapid development of the IT industry, modern corporations invest heavily in a number of software and computer-based applications. This creates risks related to technology, technical application and complexity, especially when the use of IT is key to the implementation of projects;

Process risk – this risk arises from the project management process itself and can arise, including when a process approach is applied. Thus, each process should be perceived as a risk area. If this happens in the early stages of planning the objectives, the management of process risk can be most flexible. Clear formation of the project scope and iterations of requirements through feasibility studies can provide the greatest opportunity for managing process risks. If these risks arise at a later stage of the project life cycle, their impact can be greater. It is important to note that if the phases of the life cycle (each also managed as a process) are not followed: for example, moving to the planning phase before the main idea and concept have been generally evaluated, this also poses a risk to the project;

Institutional risk – this term summarizes the risks caused by the organizational structure and behavior. These risks arise in organizations, including government agencies, and affect both large and small projects. Structures characterized by bureaucracy, lack of culture, poor practices, etc., can lead to higher levels of risks, usually pure risks.

Subjective and acceptable risk – the degree to which a person feels threatened by a particular risk, in relation to the lower probability of the risk occurring, is known as “subjective risk”. Subjective risk (among other factors), “can be influenced by a person’s personal characteristics: level of risk aversion or preference, risk appetite” (Ivanov, G., 2013, p. 30). The severity of the consequences if the risk occurs, psychological factors and knowledge of the risk will all contribute to subjective risk. Acceptable risk is the amount of subjective risk an individual or organization is willing to accept. In most cases, acceptable risk is treated by organizations in such a way that if it occurs, the existence of the organization is not threatened;

Pure and speculative risks – pure are those risks that offer only the probability of loss. They represent only the possibility of undesirable consequences. The majority of pure risks, but not all, can be insured. Unlike pure, speculative risks bring either profit or loss, and favorable or unfavorable consequences can be expected. For example, if a business risk is taken voluntarily and consciously, it falls into the category of speculative risks;

Fundamental and specific risks – fundamental risks are risks such as natural disasters that affect the whole of society or significant parts of it; over which organizations and individuals have little or no control. Often, only the management of these risks allows to reduce their effects. Specific (specific) risks are those that can be controlled to provide a wider range of available risk management options, as they are specific to the organization or an individual.

The very concept of “**corporate risk**” is found in specialized literature as “the probability that a company will suffer losses due to adverse events or decisions that may affect its financial results and reputation” (Dionne, G., 2019, pp. 7–8).

Another definition states that “corporate risk can be divided into operational, financial, market and reputational risk, each of which represents different aspects of risk that must be managed” (Hull, J., 2023, p. 429).

The given definitions show that corporate risk is related to both the economic, financial, material side of uncertainty and the probability of negative events occurring, as well as the intangible side. The above definitions mainly concern reputational risk as part of corporate risk. As has been repeatedly stated, the organization’s reputation is a key element of its intangible assets. Although the scope of corporate risk, the specialized literature includes only reputational risk, other intangible assets important for the development of the organization should not be ignored: intellectual property, processes and technologies, knowledge and experience, know-how, personnel, organizational culture and behavior. At the same time, the possibility, the chance of the occurrence of favorable events (profit, benefit, value) as a result of corporate risk should not be excluded.

Based on this, the following definition of corporate risk can be given:

Corporate risk represents both the probability of the occurrence of negative events related to loss or damage, affecting, on the one hand, its financial and economic results and, on the other, its intangible assets, and the possibility of the occurrence of favorable events for the organization (both for increasing revenues and for increasing the value and benefits of and for its intangible assets).

Corporate risk can arise in any type of business activity, oriented towards profit and related to the production and sale of products/services, including commercial and financial transactions. This risk can also arise in the implementation of projects of different scope, value, and application area. Corporate risk is inherent in the management processes in organizations, related both to the possible occurrence of negative events and threats, and to decisions to take advantage of emerging opportunities. Therefore, corporate risk should be characterized by both danger, loss, damage, and possibility, probability.

2. Modern concepts of corporate risk management

In the context of corporate risk management, the literature indicates that "corporate risk management is a mechanism of corporate policy and the use of commercial potential to reduce losses and improve the efficiency of the enterprise in conditions of economic instability (Chen, Y., et al., 2020).

It is also indicated that the issues of risk classification and the possible use of quality management policy are key principles for corporate risk management (Almeida, K., et al., 2020). Modern principles for building effective corporate policy are also related to the application of analytical methods and digital technologies that can improve the use of internal financial resources and optimize the corporate strategy through diversification or restructuring (Rubino, M., 2018).

It is believed that the most appropriate approaches to corporate risk management are the use of modern methods and tools (tests, analysis) that allow assessment of the current corporate strategy of the enterprise in the selected business segment and forecasting its development in an unfavorable economic situation or the emergence of external threats (Malik, M., M. Zaman, S. Buckby, 2020).

This thesis is also confirmed by others, who note that the application of modern methods and tests can minimize most risk factors associated with corporate risk and can optimize corporate policy under existing conditions (Lopez, J., 2021). According to this approach, the importance of applying modern methods and tools for information analysis and their possible application in the practical activities of the enterprise will be a key factor in the success of its development in the long term.

Regarding corporate risk management, it has also been noted that the implementation of a risk management system is of great importance, as this can improve the allocation of financial activity optimization and is a key factor in limiting the development of corporate risk (Sax, J., T. J. Andersen, 2019). The issue of using an effective corporate risk management system has also been studied in practice, stating that for internal corporate systems it is vital to optimize decisions at the organizational level, which will improve the rationality of the allocation of financial resources and improve the performance of all business processes as a whole (Hiebl, M., C. Duller, H. Neubauer, 2019). All this (in the modern, often unfavorable and uncertain environment), as well as issues related to corporate risk management, require additional attention and analytical research regarding the effectiveness of the implementation of existing mechanisms – identification, analysis and assessment of risk, undertaking risk management activities, control. The application of modern methods and tools for corporate risk management, as well as the effectiveness in this application, have the ability to maintain the stability of the enterprise and ensure its viability in the market.

The use of a risk management methodology in enterprises is a key pillar of corporate governance and strengthening its role in the current environment of the global economy: instability, turbulence, strong dynamics. The challenges of recent years (the pandemic crisis, wars, conflicts, migration processes) lead to the closure of enterprises and entire businesses, high inflation, shortages of petroleum products and energy supplies, etc. The use of an effective risk management system in the corporate sector promotes security and reduces the risk of loss of financial, tangible and intangible assets and enables sustainable and competitive development of organizations.

The essence of the concept of risk management is the ability to minimize the likelihood of negative events occurring for a certain type of risk. Creating a framework that neutralizes or prevents the occurrence of risk is a key factor in risk management.

The concept of risk management assumes that risk consists of four main parameters: probability of occurrence, severity of impact, sensitivity to change and degree of interdependence with other risk factors. Without any of them, the situation or event cannot be considered a risk. It is believed that this model can be used to describe risky situations or events in risk modeling and analysis (Frost, Ch., D. Allen, J. Porter, Ph. Bloodworth, 2001, p. 5):

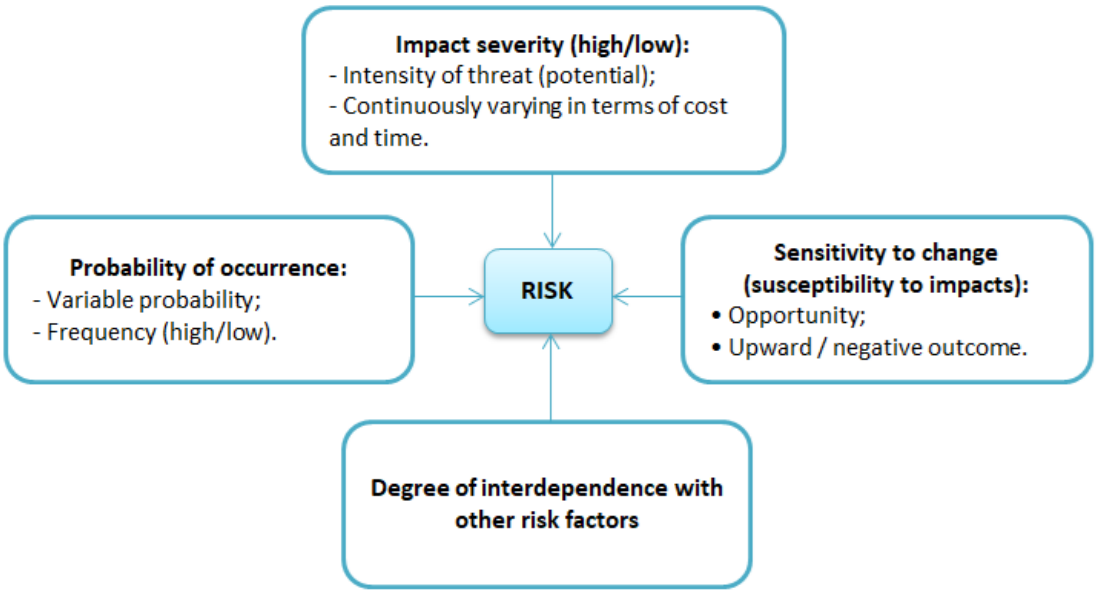


Fig. 1. Model of typical risk parameters
Source: Adapted from Frost, Allen, Porter, Bloodworth (2001), p. 5.

Such models can provide a mechanism by which risks can be communicated through the corporate governance system. The risk management system itself is also a model – it provides a means of identification, classification and analysis, after which a decision can be made whether to take a risk or not. In addition, these models can provide a "backup" to the often unreliable human intuition. Therefore, it can be said that such a model has two main roles:

- To provide answers to key questions;
- To act as a communication tool, deriving risk factors that could not be identified in any other way.

The generally accepted definition of risk – the probability that something undesirable can happen at a given time – seems simple from a conceptual point of view. However, from a practical point of view, it is quite difficult to apply. This definition does not provide any guidance on the overall context and how risks might occur and be perceived.

3. Opportunities for improving the application of modern concepts in corporate risk management in investment projects

According to the literature, most people think of risk in terms of three components (Kaplan, S., B. Garrick, 1981).

- Something bad happens;
- The chances of it happening;
- The consequences if it happens.

These three components of risk are used as the basis of the risk assessment framework, with each of them capturing risks through (Kaplan, S., B. Garrick, 1981):

- A set of scenarios or similar events (something bad happens);
- The probabilities in which the events occur (the chances of something bad happening);
- Measures of the consequences associated with the events (if they happen).

In a sense, this structure raises the question of the definition of the term "risk", as it leaves it up to the risk assessor to determine what "bad" means in the context of a given (specific) risk, what scenarios or events can lead to it, and how to measure the severity of the outcomes. Thus, the steps involved in defining and measuring risk should include:

- Providing one's own definition of "bad" (by identifying the organization's goals and resources that are at risk);
- Identifying scenarios whose occurrence could threaten the organization's resources and their value;
- Measuring the severity or magnitude (scale) of the consequences (impacts).

The severity or magnitude of the consequences is measured by a value function that provides the common denominator. Severity can be an average value derived from a set of units (for example, the severity of consequences is determined by a scale of 3 out of 5, with 1 being the lowest and 5 being the highest).

In corporate risk management, a distinction is made between “risk” and “uncertainty”, although the two concepts are also used synonymously. Uncertainty is used to describe a situation in which it is not possible to “attach” the occurrence of an event to the probability of its occurrence. Uncertainty causes a gap between a good decision and a good outcome. The distinguishing factor between risk and uncertainty is that the risk taken has quantifiable attributes and a place in the calculation of probabilities, while uncertainty does not.

According to more recent studies, the statements that clarify uncertainty are (Johansen, A., et al., 2019, pp. 37–38):

- Risk is a consequence of a phenomenon being uncertain;
- The consequences of a phenomenon being uncertain may be desired or undesired;
- Uncertainty and its consequences must be understood and identified correctly.

If viewed through the lens of project management, it can be said that a distinction between “risk” and “uncertainty” is also necessary. An undertaking in which multiple resources are organized and which in a new way must perform a unique scope of work with a given specification, within the constraints of cost and time, so as to achieve a desired change, by achieving the project objectives, implies an inherent uncertainty that requires attention as part of the effectiveness of project management processes.

Project risk management processes are usually motivated by large investments, innovative technologies and many other obvious sources of significant risk. It can be said that the uncertainty associated with the high-risk impact in the context of a given event in project implementation represents an even greater unknown than the quantified risk associated with the same event.

As has been stated, risk is a consequence of a given phenomenon being uncertain, it is important to propose a characterization of risk and uncertainty, but not as two separate phenomena independent of each other, but rather as a sequence in one continuous whole (Fig. 2):

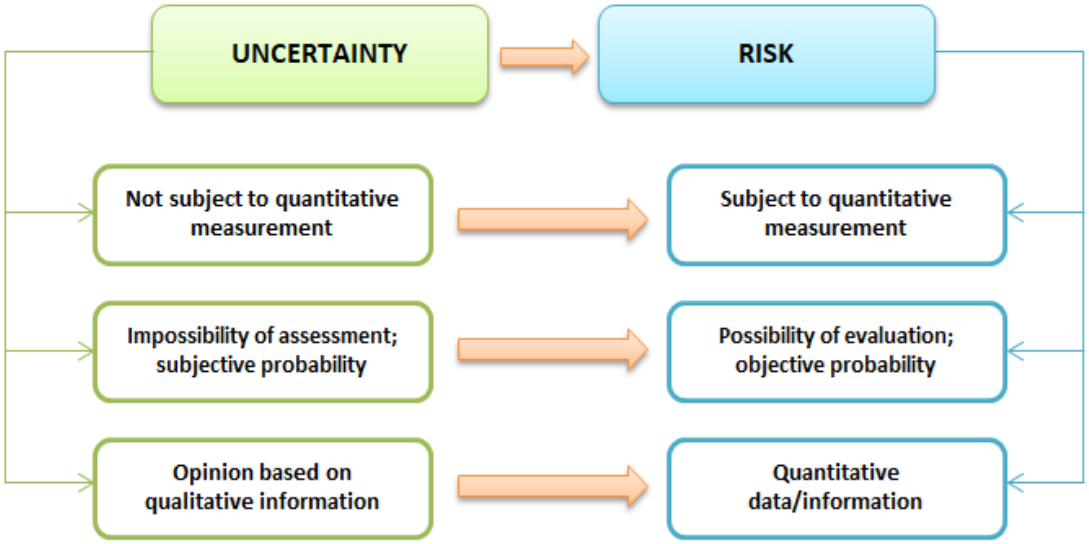


Fig. 2. Model “uncertainty – risk”
Source: Author

Such a model can be useful in determining the sources of risk for an organization or for a specific project, when identifying typical risks. For example, in their identification, a table with the name of the risk and a characteristic of the causes of uncertainty (the risk as a consequence of the listed causes determining uncertain events) can be used (Tab. 1):

Risk	Uncertainty (causes)
Internal	
Project risk	Performance requirements, standards, leadership, organization (maturity, commitment, competence, experience), planning, execution and control, labor and resources, communications.
Financial risk	Financial results, profit / loss.
Non-financial risk	Intellectual capital, reputation, human capital.
Market risk	Demand, forecasts, competition, users, satisfaction.
Technical risk	Design adequacy, operational efficiency, reliability.
External	
Political risk	Government policy, change in ideology, legislation, regulatory regimes.
Economic risk	Economic policy, taxation, inflation, interest rates.
Environmental risk	Liability, restrictions (noise, traffic), corporate policy, environmental norms (regulations, practices), impact requirements.
Social risk	Public opinion, attitudes, benefits, value, satisfaction.
Legislative risk	Changes in legislation, changes in EU directives.

The concept of risk management includes effective management of all units and processes in the organization, using modern risk management techniques that make it possible to create analytical scenarios for development based on current data. As a rule, most threats to the organization can be classified into two key categories: internal and external. On this principle, the main group of risks is also determined: internal risks arising in the enterprise, through its work, management policy and business specifics, and external – those that are independent of the enterprise and are of a more global scale.

The proposed sample list is not complete or exhaustive, since risks can be specific (for the organization, for the project in particular). At the project level, the manager should make sure that the risks associated with corporate and strategic business functions are fully assessed and managed. In many business cases, for many risks (assessed initially at the corporate and strategic business levels), reassessment is required as the project progresses. Often, a new identification is also required, since during the course of the project, new, previously unknown risks may also appear.

In summary, it can be added that a source of risk is any factor that can affect the implementation of the project, and what is more specific in project management is that risk arises when its effect (the consequences of the occurrence of a probabilistic event) can be both significant and uncertain.

Conclusion

As a result of the issues considered and the analyses and findings made in relation to modern concepts for managing corporate risks in investment projects, as well as in accordance with the goal set for this article, the following conclusions and inferences can be drawn:

First. Theoretical concepts and approaches to corporate governance, which were initially based on the protection of shareholders' interests, gradually developed towards more complex models that include all groups of stakeholders and attach greater importance to cognitive aspects in value creation.

Second. Corporate governance is also related to strategic management, and corporate strategy is a significant tool for defining the corporate mission of the organization and for determining its goals and priorities in the future.

Third. The use of a risk management methodology in enterprises is a key pillar of corporate governance and strengthening its role in the current environment.

Fourth. Corporate risk management aims to understand, analyze and assess the risk that is known to be related to the corporate strategic plan.

Fifth. In addition to the management of corporate risks, identified mainly as threats, principles for managing these risks should be established, which, if followed, may also lead to the emergence of corresponding favorable opportunities.

In conclusion, it can be summarized that modern organizations are faced with more and more problems and challenges that carry the concept of corporate risk. Corporate risk management – as a threat and as an opportunity – requires the management of a complex of multiple processes. Challenges should be managed by organizations not only in connection with increasing profits, but also in order to achieve key goals (corporate, economic, social, etc.), to create value and, above all, to have a long-term existence. Corporate risk should not be understood only as the possibility of something failing, since the current concept of risk in the corporate world goes further: it also includes the favorable possibility of something happening.

References:

1. Abideen, A., F. Mohamad, Y. Fernando (2020). Lean simulations in production and operations management – a systematic literature review and bibliometric analysis. Journal of Modelling in Management. DOI:10.1108/JM2-05-2019-010, Corpus ID: 224960995.
2. Almeida, K., et al. (2020). Agency conflicts and asymmetry of accounting information: between decision making and corporate management. International Journal of Professional Business Review, 5(2), 234-255, doi: https://doi.org/10.26668/businessreview/2020.v5i2.199
3. Annamalah, S., et al. (2018). Implementation of Enterprise Risk Management (ERM) Framework in Enhancing Business Performances in Oil and Gas Sector. Economies, 6(1): 4, 1–12, doi: 10.3390/economies6010004.
4. BDS (EN) 31010:2010. Risk Management. Risk Assessment Methods (IEC/ISO 31010:2009).
5. Chen, Y., et al. (2020). The value of implementing enterprise risk management: Evidence from Taiwan's financial industry. The North American Journal of Economics and Finance, Elsevier, vol. 54(C), 100926, doi: https://doi.org/10.1016/j.najef.2019.02.004
6. Dionne, G. (2019). Corporate Risk Management: Theories and Applications. Wiley Publishing, New Jersey: US. ISBN: 978-1-119-58312-7.
7. Ivanov, G. (2013). Risk Management in Public Sector Organizations of the Republic of Bulgaria. Svishtov: AI „Tsenov". ISBN: 978-954-23-0840-9.
8. Frost, Ch., D. Allen, J. Porter, Ph. Bloodworth (2001). Operational Risk and Resilience Understanding and Minimising Operational Risk to Secure Shareholder Value. Butterworth-Heinemann: Oxford, United Kingdom, ISBN: 978-0-7506-4395-5, e-Book ISBN: 978-0-0805-1314-0.
9. Johansen, A., et al. (2019). Project Risk and Opportunity Management: An Owner's Perspective. Routledge: London: UK, ISBN: 978-0-429-43058-9 (ebk).
10. Hiebl, M., C. Duller, H. Neubauer (2019). Enterprise Risk Management in Family Firms: Evidence from Austria and Germany. The Journal of Risk Finance, 20(1), 39–58, doi:10.1108/JRF-01-2018-0003.
11. Hull, J. (2023). Risk Management and Financial Institutions (6th Edition). Wiley Publishing, New Jersey: US. ISBN: 978-1-119-93248-2.
12. Kaplan, S., B. Garrick (1981). On The Quantitative Definition of Risk. Risk Analysis, 1, 11–27, doi: 10.1111/J.1539-6924.1981.TB01350.X, Corpus ID: 16560206.
13. Lopez, J. (2021). How Can Enterprise Risk Management Help in Evaluating the Operational Risks for a Telecommunications Company? Journal of Risk and Financial Management, 14(139), 1–26, doi: https:// doi.org/10.3390/jrfm14030139
14. Malik, M., M. Zaman, S. Buckby (2020). Enterprise risk management and firm performance: Role of the risk committee. Journal of Contemporary Accounting & Economics, 16(1), 100178, doi: https://doi.org/10.1016/j.jcae.2019.100178
15. Mancheva, Zh. (2016). Project Risk Management. Sofia: UACEG. ISBN: 978-619-90883-1-9.
16. Merna, T., F. Al-Thani (2008). Corporate Risk Management (2nd Edition). John Wiley & Sons Inc.: Cornwall, UK. ISBN 978-0-470-51833-5.
17. Rubino, M. (2018). Comparison of the Main ERM Frameworks: How Limitations and Weaknesses can be Overcome Implementing IT Governance. International Journal of Business and Management, 13(12), 203–214, doi: https://doi.org/10.5539/ijbm.v13n12p203.
18. Sax, J., T. J. Andersen (2019). Making risk management strategic: Integrating enterprise risk management with strategic planning. European Management Review, 16(3), 719–740, doi: 10.1111/emre.12185.

S E S 2 0 2 6
Twenty-second International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
20 – 24 October 2026, Stara Zagora, Bulgaria

ВЛИЯНИЕ НА UV-A, UV-B, UV-C ВЪРХУ ЗРИТЕЛНАТА СИСТЕМА И ЗАЩИТНИ МАТЕРИАЛИ

Зоя Асенова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: z.asenova@space.bas.bg

Ключови думи: UV-A, UV-B, UV-C, Око

Резюме: *Описва се ултравиолетовото (UV) лъчение и неговото въздействие върху човешкото зрение, особено в спектрите UV-A и UV-B с доказан вреден ефект. Докато сме на Земята, атмосферата ни пази от по-агресивните UV-C и част от UV-B лъчи на слънцето, но в Космоса или условия на висока надморска височина – защитата е почти нулева. Настоящата статия разглежда земните рискове свързани с UV лъчите, въздействието на космическата радиация върху астронавтите и материали за защита.*

INFLUENCE OF UV-A, UV-B, AND UV-C ON THE VISUAL SYSTEM AND PROTECTIVE MATERIALS

Zoya Asenova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
email: z.asenova@space.bas.bg

Keywords: *UVA, UVB, UVC, Eye*

Abstract: *Describes ultraviolet (UV) radiation and its impact on human vision, especially in the UV-A and UV-B spectra with proven harmful effects. While we are on Earth, the atmosphere protects us from the more aggressive UV-C and some UV-B rays of the sun, but in space or high altitude conditions – the protection is almost zero. This article examines both the terrestrial risks associated with UV rays and the impact of space radiation on astronauts.*

Въведение

Ултравиолетовите лъчи (UV) са невидими за нормалното (еметропично) човешко око електромагнитни вълни с висока енергия. Те са открити през 1801 г. от германския физик Йохан Ритер и дълго време са наричани „химически лъчи“. Разделят се основно на: UV-A (315–400 nm) ниско енергийни, проникват дълбоко в очните структури; UV-B (280–315nm) – с умерено висока енергия, основен причинител на повърхностни увреждания като птеригиум, кератит и фотокератоконус; UV-C (100–200nm) – с висока енергия, които на земята се абсорбират от озоновия слой, но в космически условия могат да предизвикат сериозни увреждания на роговицата и лещата.

Те са електромагнитно излъчване, състоящи се от фотони с висока енергия. UV лъчите се различават по дължина на вълната и енергия – интензитет падаща върху единица площ, което определя ефекта им върху зрителната система. В Космоса където няма атмосфера всички UV лъчи са налични и опасни особено за очите – един от най-деликатните ни органи с оптична система, включваща роговица (около 45 D) и леща (19–20 D), които проектират изображението върху ретината. Нашият естествен щит срещу най-опасните UV лъчи е озоновият слой (O_3), който абсорбира почти цялото UV-C и значителна част от UV-B спектъра. Благодарение на него до земната повърхност достигат главно UV-A и остатъчно UV-B лъчение. Когато този щит е изтънен от атмосферни процеси или се намираме на висока надморска

височина, ултравиолетовото лъчение достига до нас с висока (фотохимична) енергия. Фотоните са открити по-трудно във Вакуумното ултравиолетово излъчване (с дължина на вълната под 200 nm), през 1893 г. от германеца Виктор Шуман имат: честота (**V** колко интензивно трепти вълната), дължина на вълната (разстоянието между два върха) и енергия – колкото по-къса е вълната толкова по енергичен е фотона. Всеки фотон който достига фоторецепторните клетки – пръчици, колбички в ретината носи енергия определящ се от формулата на Планк (1)

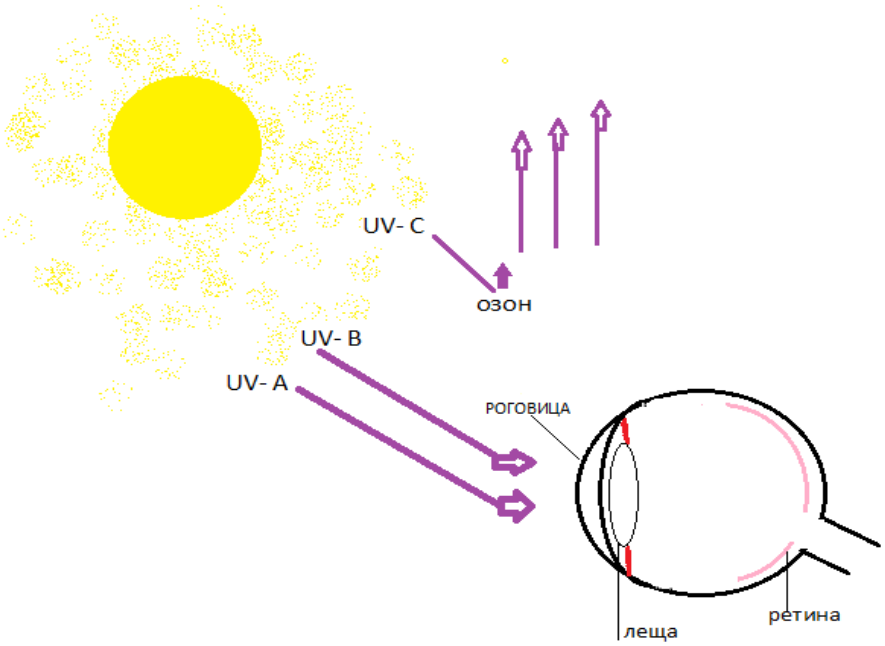
(1) $$E = h \times \nu = hc \div \lambda,$$

където **h** е константа на Планк = $6.626.10^{-34}$ J.s = $4.136.10^{-15}$ e V.s., **V** честота, **E** енергия, **λ** дължина на вълната, **c** е скоростта на светлината във вакуум ≈ 299 792 458 $m.s^{-1}$.

Когато слънчевата ултравиолетовата светлина проникне в човешкото око, тя преминава през зеницата и ирисния отвор. Ирисът регулира площта (A), през която навлизат фотоните, като по-широката зеница осигурява по-голяма площ за преминаване на светлинния поток. Интензитетът показва колко фотона (всеки с енергия hv) достига върху дадена площ за единица време – t (2).

(2) $$\boldsymbol{I} = \frac{\mathbf{N}\times\mathbf{h}\times\boldsymbol{c}}{\boldsymbol{\lambda}\times\mathbf{A}\times\boldsymbol{t}}.$$

Формула (2) – където $\boldsymbol{I}$ е интензитета на светлината (W/m^2), **N** е броят на фотоните, **h** е константата на Планк, **c** е скорост на светлината във вакуум (~ $3*10^8$ m/s), **λ** е дължината на вълната (m), **A** е площта на зеничния отвор (m^2), а **t** е времето (s).



Фиг. 1. Еметропично око, UV-A, UV-B, UV-C, Слънце

Слънчевата ултравиолетова радиация (100–400 nm) представлява една от най-биологично активните части на електромагнитния спектър. Въпреки че представлява по-малко от 10% от общата слънчева радиация, нейното въздействие върху живите тъкани е значително. С увеличаване на надморската височина, атмосферната плътност намалява, което намалява абсорбцията и разсейването на UV фотоните от озона (O_3) и кислорода (O_2). Следователно, на всеки 1000 m надморска височина, UV облъчването обикновено се увеличава с приблизително 10–12%, като най-изразената промяна е в UV-B лентата (280–315 nm). Човешките очни тъкани – особено роговицата, конюнктивата и леща – абсорбират UV лъчението в различна степен в зависимост от дължината на вълната. Краткосрочното излагане може да причини фотокератит (снежна слепота), докато продължителното излагане води до хронични дегенеративни изменения на очната повърхност. Типичен пример за такова изменение е птеригиумът – фиброваскуларна пролиферация на конюнктивата, която прогресивно навлиза върху роговицата.

Част от UV-A лъчите проникват не само в лещата на окото, но и по-дълбоко, достигат до пигментният ретинен епител и централната част на ретината-макулата. Там техният интензитет предизвиква недостиг на микроелементи и натрупване на свободни радикали, което уврежда фоторецепторите и се свързва с развитието на възрастово-обусловена макулна дегенерация. Продължителното излагане на UV-A предизвикват фотохимични реакции и оксидативен стрес в очните структури. Това засяга диска на зрителния нерв и увреждa аксонните израстъци на ганглийните клетки, което е рисков фактор за развитие на глаукома и нарушаване на зрителната проводимост към мозъка

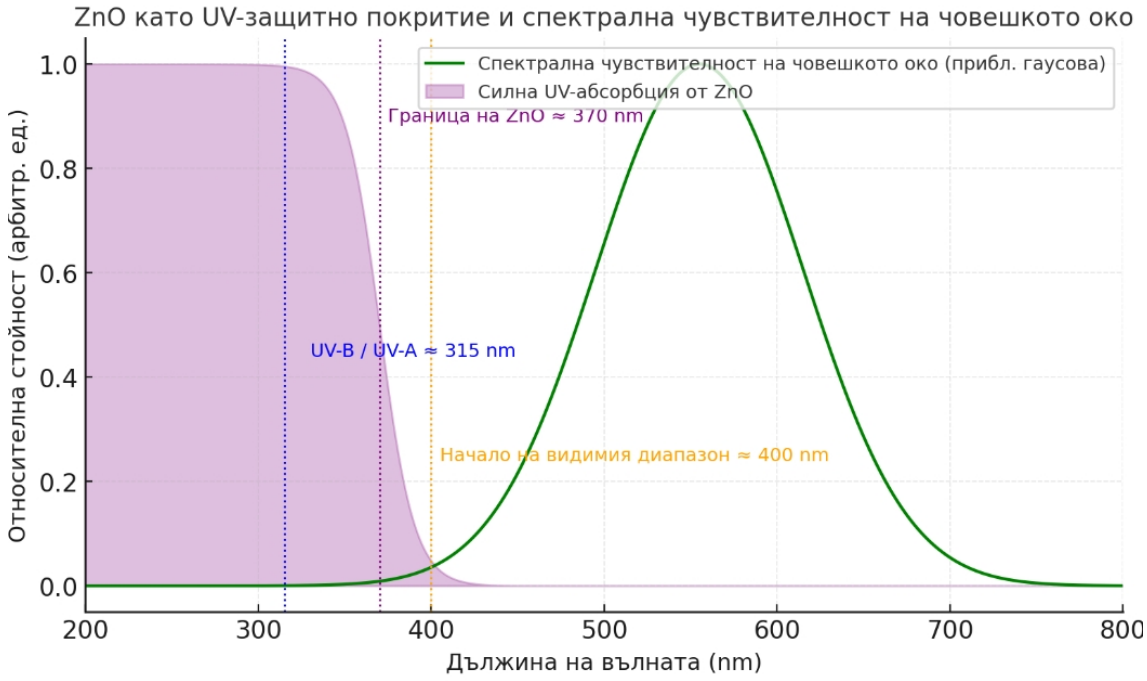
UV-B лъчението (280–315 nm) притежава умерена енергия и е основен причинител на остри повърхностни увреждания на окото, като фотокератит (снежна слепота), кератит и образуване на птеригиум.

Извън защитната земна атмосфера и озоновия слой тези лъчи заедно с по кратките UV-C вълни, представляват сериозна заплаха както за биологичните структури, така и за сателитната оптика. За неутрализирането им се използват минерални UV филтри като цинков оксид (ZnO) и титанов диоксид (TiO_2), които могат да се нанасят под формата на тънки филми върху оптични елементи или да се вграждат в защитни текстилни материали и скафандри.

Таблица 1. Дължина на вълната във вакуум, спектрална област, защитни материали-покрития

100 nm–280 nm	UVC	ултравиолетова област C	MgF_2, AlN, SiO_2, ZnO
280 nm–315 nm	UVB	ултравиолетова област B	ZnO, TiO_2, Al_2O_3, AlN
315 nm–380 nm	UVA	ултравиолетова област A	CeO_2, ZnO
380 nm–760 nm	VIS	видима област	HEV,Nd_2O_3
760 nm–1,4 μm	NIR	близка инфрачервена област	Au, Ge
1,4 μm–3,0 μm	SW IR	късовълнова инфрачервена област	Ge, ZnSe, CaF_2,
3.0 μm–8,0 μm	MW IR	средновълнова инфрачервена област	Ge, ZnSe, Si
8,0 μм–15,0 μм	LW IR	дълговълнова инфрачервена област	Ge, ZnSe, AMTIR

ZnO е с широка забранена зона ~ 3,3–3,4 eV, което съответства на критичната дължина на вълната около 370 nm. Това е спектралната честота, при която фотоните с по-висока енергия (по-къси дължини на вълната – UV-B и част от UV-A) не могат да преминат свободно. При попадане в слоя ZnO, те биват погълнати, като енергията им се преобразува в топлина или се разсейва чрез флуоресценция.



Фиг. 2.

В диаграмата е показано гаусово приближение на спектралната чувствителност. Това илюстрира, че максимумът на видимото възприятие е далеч от UV, което означава, че въпреки, че окото е най-чувствително в зелено-жълтия спектър, UV фотоните имат по-голяма енергия и могат да причинят заболявания дори когато не ги виждаме и усещаме.

Ултравиолетовото лъчение не само, че променя начина, по който виждаме, но и поставя под заплаха самата способност да виждаме. На Земята разчитаме на естествената атмосферна преграда, докато в Космоса тези защитни системи трябва да бъдат изцяло създадени от човек. Разбирането на ефектите от UV-A, UV-B, UV-C лъчите върху очите остава ключов научно-приложен приоритет, защото очите ни са прозорец към душата на вселената.

Литература:

1. Blumthaler, M., & Ambach, W. (1990). Altitude effect of solar UV radiation dependent on albedo, turbidity and solar elevation. Applied Optics, 29 (12), 1590–1593.
2. McKenzie, R., et al. (2009). Altitude and latitude variations of UV radiation. Photochemical & Photo biological Sciences, 8, 476–482.
3. World Health Organization (WHO) (2017). Ultraviolet radiation and the INTERSUN Programme. Geneva: WHO Press.
4. Sliney, D. H. (2002). Geometrical assessment of ocular exposure to environmental UV radiation. Photochemistry and Photobiology, 76 (4), 397–400.
5. Lupu, R., & Ricard, D. (2018). UV protective materials and coatings for mountain environments. Journal of Optical Materials, 85, 56–63.

ALTERED STATES OF CONSCIOUSNESS AS A SAFETY FACTOR IN LONG-DURATION SPACEFLIGHT

Nikola Pirovski

Department of Anatomy, Faculty of Medicine, Trakia University, Stara Zagora, Bulgaria
e-mail: nikola.pirovski@trakia-uni.bg

Keywords: *altered states of consciousness, space psychology, psychological safety, cyber risk, long-duration spaceflight, ecology of consciousness*

Abstract: *Introduction: Long-duration space missions expose crews to extreme isolation, confinement, monotony, and constant dependence on technological systems. Psychological safety in this context cannot be reduced to the absence of disorders; it must include the capacity to maintain inner stability, flexibility, and meaning under prolonged stress. This paper examines altered states of consciousness (ASC) as a potential safety factor in long-duration spaceflight, in connection with recent work on risk in the cyber environment. Materials and Methods: The analysis integrates previous descriptions of ASC as psychophysiological states differing from ordinary waking consciousness in attention, self-experience, time perception, and emotional regulation, with the concept of cyber risk as a complex bio-psycho-social risk with daily, massive exposure. A space habitat is treated as an extreme form of such a cyber environment, where physical, psychological, and informational risks merge. Results: Within this perspective, ASC can serve three safety-related functions. First, as a mechanism for regulating stress and emotions under chronic isolation and monotony. Second, as a resource for inner distance from the cyber environment: consciousness practices allow the person to temporarily "step out" of operational mode and experience themselves beyond the role of system operator. Third, as a basis for shared, ritualized experiences within the crew that strengthen trust and reduce the risk of conflicts and group dynamics that can lead to errors. Discussion: ASC are not proposed as a panacea but as one element of a broader psychological safety strategy, which must also include assessment of cyber risk and ethical constraints. Non-pharmacological, culturally adaptable techniques are emphasized, compatible with diverse crews and mission constraints. Conclusion: When carefully, evidence-based, and ethically integrated into training and in-flight routines, altered states of consciousness can contribute to a more resilient "ecology of consciousness" in space, supporting both crew health and mission success.*

ИЗМЕНЕНИ СЪСТОЯНИЯ НА СЪЗНАНИЕТО КАТО ФАКТОР ЗА БЕЗОПАСНОСТ ПРИ ПРОДЪЛЖИТЕЛНИ КОСМИЧЕСКИ ПОЛЕТИ

Никола Пировски

Катедра по анатомия, Медицински факултет, Тракийски университет, Стара Загора, България
e-mail: nikola.pirovski@trakia-uni.bg

Ключови думи: *изменени състояния на съзнанието, космическа психология, психологическа безопасност, киберриск, продължителен космически полет, екология на съзнанието*

Резюме: *Въведение: Продължителните космически мисии излагат екипажите на крайна изолация, затвореност, монотонност и постоянна зависимост от технологични системи. Психологическата безопасност в този контекст не може да се сведе само до отсъствие на разстройства; тя трябва да включва способността за поддържане на вътрешна стабилност, гъвкавост и смисъл при продължителен стрес. Настоящият доклад разглежда измененитe състояния на съзнанието (ИСС) като потенциален фактор за безопасност при продължителни космически полети, във връзка с неотдавнашна работа върху риска в киберсредата. Материали и методи: Анализът интегрира предишни описания на ИСС като психофизиологични състояния, различаващи се от обикновеното будно съзнание по отношение на вниманието, самовъзприятието, възприятието за време и емоционалната регулация, с концепцията за киберриск като комплексен био-психо-социален риск с ежедневна и масова експозиция. Космическият хабитат се разглежда като екстремна форма на такава киберсреда, в която физическите, психологическите и информационните рискове се сливат. Резултати: В рамките на тази перспектива ИСС могат да изпълняват три функции, свързани с*

безопасността. Първо, като механизъм за регулация на стреса и емоциите при хронична изолация и монотонност. Второ, като ресурс за вътрешна дистанция от киберсредата: практиките на съзнанието позволяват на човека временно да „излезе“ от оперативния режим и да преживее себе си отвъд ролята на системен оператор. Трето, като основа за споделени, ритуализирани преживявания в екипажа, които укрепват доверието и намаляват риска от конфликти и групова динамика, водещи до грешки. Дискусия: ИСС не се предлагат като панацея, а като един елемент от по-широка стратегия за психологическа безопасност, която трябва да включва и оценка на киберриска, както и етични ограничения. Акцентът е върху нефармакологични, културно адаптивни техники, съвместими с разнородни екипажи и ограниченията на мисията. Заключение: Когато бъдат внимателно, основано на доказателства и етично интегрирани в обучението и рутините по време на полет, измененитe състояния на съзнанието могат да допринесат за по-устойчива „екология на съзнанието“ в космоса, подкрепяйки както здравето на екипажа, така и успеха на мисията.

1. Introduction

Long-duration space missions place crews in conditions of extreme isolation, confinement, monotony, and constant dependence on technological systems. Psychological safety in this context cannot be reduced solely to the absence of mental disorders. It must include the capacity to maintain inner stability, flexibility, and meaning under prolonged stress [1, 2].

Altered states of consciousness (ASC): Psychophysiological states that differ from ordinary waking consciousness with respect to attention, self-experience, time perception, emotional regulation, and information processing. They may arise spontaneously or be induced through non-pharmacological practices (meditation, rituals, sensory modulation, etc.) and are regarded as a potential resource for inner distance, stress regulation, and the maintenance of meaning under extreme conditions.

Safety factor: An element or mechanism that increases the resilience of the system (in this case, the crew) to risks by reducing the probability of errors, conflicts, emotional breakdown, or loss of performance. In the context of space missions, ASC are considered one such factor within a broader strategy of psychological safety.

Long-duration / prolonged spaceflight: A space mission lasting from several months to years, characterized by prolonged isolation, confinement, microgravity, sensory monotony, limited communication with Earth, and constant dependence on life-support technological systems.

Human presence in space is often formulated as a matter of reaching, surviving, and accomplishing the mission. The present paper defends a more modest yet fundamental position: even with perfect technical safety, the human being can be existentially endangered if the lived experience of the body, time, and meaning is neglected. These dimensions are particularly relevant to the topic of psychological crisis during long-term residence in an artificial and confined environment. Isolation and confinement (Isolated and Confined Extreme – ICE environments) lead to measurable changes in mood, cognitive functions, interpersonal relations, and even brain plasticity [3, 4].

2. Materials and Methods

The analysis is conceptual and philosophical. It draws on phenomenological descriptions of bodily experience, temporality, and meaning, as well as on the existing literature in the fields of space medicine, psychology, and ethics. No new theoretical framework is proposed; the focus is on three concrete dimensions of human existence in space habitats and on their relation to altered states of consciousness as a possible resource for psychological safety. The space habitat is treated as an extreme form of a cyber environment in which physical, psychological, and informational risks merge [5].

3. Results

3.1. Transformation of bodily experience

The space environment radically alters the experience of the body. Under conditions of microgravity, isolation, and constant dependence on life-support systems, the body shifts from the mode of “I can” to the mode of “I am being maintained.” There is a risk that the astronaut may turn from a living subject into a functional component of the mission. This transformation is existential rather than merely physiological. Microgravity disrupts vestibular and proprioceptive signals, leading to changes in the sense of self-location, bodily coherence, and the boundaries of the self [6, 7]. Similar effects are observed in sensory deprivation and in certain mental states such as depersonalization and derealization.

3.2. Collapse of time

In confined habitats, time tends to collapse into operational time. Personal and biographical rhythm becomes subordinated to strict schedules and to delayed communication with Earth. Personal temporality narrows, intensifying the sense of monotony and potentially contributing to psychological crisis. The “third-quarter phenomenon” is well documented: after the midpoint of a mission a decline in mood, motivation, and performance is often observed [8, 9]. Experiments such as Mars-500 and HI-SEAS show that the perception of time becomes distorted, the future appears blurred, and memories of the past intensify nostalgia and a sense of loss [10].

3.3. Erosion of meaning

In a fully artificial environment in which every gesture is regulated, the questions “why am I here” and “what am I doing with this life” become simultaneously more urgent and more difficult to articulate. This leads to a quiet erosion of meaning – a process that may remain unnoticed until it has already affected motivation, group dynamics, and crew resilience. Existential anxiety and the feeling of detachment from Earth (the “Earth-out-of-view phenomenon”) can intensify loneliness and a sense of meaninglessness [11]. At the same time, some astronauts describe transformative experiences (overview effect, ultraview effect) that expand perspective and can strengthen the sense of connectedness [12].

3.4. Altered states of consciousness as a safety factor

Altered states of consciousness can fulfill three safety-related functions:

- a mechanism for regulating stress and emotions under chronic isolation and monotony;
- a resource for inner distance from the cyber environment – the practices allow temporary “stepping out” of operational mode and experiencing oneself beyond the role of system operator;
- a basis for shared, ritualized experiences within the crew that strengthen trust and reduce the risk of conflicts and errors arising from group dynamics.

From the perspective of predictive processing, microgravity and prolonged isolation can relax the brain’s high-level priors (including the deeply entrenched gravitational prior). This temporary loosening of hierarchical constraints facilitates states of increased global integration and altered self-experience that share certain computational features with non-ordinary states of consciousness. Non-pharmacological practices that induce ASC may therefore act as controlled ways of exploiting this neurocognitive plasticity, supporting emotional regulation and the restoration of meaning under extreme conditions [6, 13]. ASC are not proposed as a panacea but as one element of a broader psychological safety strategy that must also include assessment of cyber risk as well as ethical constraints. Emphasis is placed on non-pharmacological, culturally adaptable techniques compatible with diverse crews and mission constraints. Russian space psychology has long paid attention to the “soft” altered states of consciousness that arise naturally under orbital conditions [14].

4. Discussion

The three dimensions – body, time, and meaning – show that existential risk accompanies technical risk. An astronaut may be physically safe yet existentially insecure if embodiment, temporality, and the sense of purpose are systematically undermined by the design of the mission and the habitat.

In the context of psychological crisis during long-duration flights, this means that the crisis does not necessarily arise only in response to acute incidents. Often it results from the gradual accumulation of transformations in bodily experience, the narrowing of time, and the erosion of meaning. Studies of Antarctic expeditions, submarines, and Mars-mission simulations (Mars-500, HI-SEAS, SIRIUS) confirm that prolonged isolation leads to increased irritability, social withdrawal, cognitive changes, and interpersonal tension [3, 9, 15].

In the analysis of the characteristics and modes of use of the International Space Station (ISS) it is emphasized that the station functions as a complex, fully closed, and technologically mediated environment in which every element of crew daily life – from motor activity and nutrition to communication, rest, and scientific work – is strictly regulated and dependent on life-support systems and ground control. This specific architecture and operational regime create conditions in which bodily experience is transformed, time shrinks to an operational rhythm, and questions about the meaning of presence acquire particular acuity. Precisely these features of the ISS as a real habitat show that existential and psychological challenges are not a side effect but an inseparable part of the very use of the station, making the integration of approaches to psychological safety – including altered states

of consciousness – necessary for the sustainable functioning of the human being on long-duration missions [18].

In the study “Risk in Cyber Environment” [19] it is argued that the cyber environment constitutes a new type of interaction medium that modifies existing risks and generates qualitatively new ones requiring a special evaluation instrument. The authors emphasize that the risk is not limited to the informational sphere but is a complex, personal, bio-psycho-social risk with daily and mass exposure and diverse consequences, whose assessment is currently inadequate and leads to underestimation. This understanding is especially relevant to the space habitat, which can be regarded as an extreme form of a cyber environment in which physical, psychological, and informational risks merge and mutually reinforce one another, making the integration of strategies for psychological safety and an ecology of consciousness necessary.

In August 2018 a slight pressure drop was recorded aboard the International Space Station (ISS). Official investigations by Roscosmos (with the participation of NASA) established that the hole resulted from human intervention with a drill, yet the final public conclusions concerning the exact place and cause (manufacturing defect on Earth, accidental error, or deliberate action) have not been disclosed in detail. An agreement exists between the two agencies not to publish the full results. Early statements by Roscosmos leadership admitted both a manufacturing error (subsequently sealed) and other versions, but later media speculation and individual comments pointing to sabotage by astronaut Serena Auñón-Chancellor, medical problems as a pretext, a damaged toilet, interpersonal conflicts, and deliberate sabotage or psychological breakdown have not been confirmed by official sources [17]. The classification of the data from this incident suggests significant difficulties in establishing the truth.

An important practical parallel is also offered by the experience of China. At a conference on aerospace medical engineering in Tianjin, experts emphasized that traditional Chinese medicine (TCM) plays a significant role in supporting crewed space missions. The holistic approach of TCM proves particularly suitable for the conditions of microgravity, where astronauts encounter changes in respiration, digestion, and mobility. During the Shenzhou-21 mission (nearly seven months in orbit) the crew used TCM apparatus for stimulating nerves and muscles in the middle and late stages of the flight in order to counteract muscle atrophy. The Chinese space station Tiangong is supplied with TCM medicines and functional drinks that help protect against radiation and support the immune system [16].

The integration of carefully selected, evidence-based, and ethically justified practices of altered states of consciousness can contribute to a more resilient “ecology of consciousness” in space – an ecology that supports both crew health and mission success. This includes both individual practices (meditation, mindfulness, rituals) and group practices that strengthen trust and shared identity.

5. Conclusion

The ethical question of human presence in space should begin from concrete experiences rather than from abstract principles. Attention to the living body, personal time, and meaning does not guarantee mission success, yet neglecting them renders any “safe” mission existentially risky for the human being who inhabits it. When altered states of consciousness are carefully, evidence-based, and ethically integrated into training and in-flight routines, they can become part of the strategy for psychological safety on long-duration space missions.

Acknowledgements:

Trakia University scientific project: Assembly of Faith and Knowledge 19/2026

References:

1. Palinkas, L. A., & Suedfeld, P. (2021). Psychosocial issues in isolated and confined extreme environments. „Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 126“, 413–429. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.03.032
2. NASA. (2024). „Risk of behavioral changes and psychiatric disorders“. Human Research Program. https://www.nasa.gov/reference/risk-of-behavioral-changes-and-psychiatric-disorders/
3. Stahn, A. C., Gunga, H.-C., Kohlberg, E., Gallinat, J., Dinges, D. F., & Kühn, S. (2019). Brain changes in response to long Antarctic expeditions. „New England Journal of Medicine, 381“(23), 2273–2275. https://doi.org/10.1056/NEJMc1904905
4. Dunn Rosenberg, J., Jannasch, A., Binsted, K., & Landry, S. (2022). Biobehavioral and psychosocial stress changes during three 8–12 month spaceflight analog missions with Mars-like conditions of isolation and confinement. „Frontiers in Physiology, 13“, 898841. https://doi.org/10.3389/fphys.2022.898841
5. Livak, N. (2026). Long-duration space flights and the psyche of cosmonauts. „RIA Novosti“ / Reshetnev University (interview and analysis).

6. Nezami, A., & Ferrè, E. R. (2026). Space Oddity: Microgravity as a neurocognitive catalyst for transformative consciousness experiences. „Frontiers in Psychology, 17“, 1769177. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2026.1769177
7. Seidler, R. D., et al. (2026). Related peer-reviewed findings on brain positional and structural changes after spaceflight (reported in ScienceAlert and associated publications).
8. Bechtel, R. B., & Berning, A. (1991). The third-quarter phenomenon: Do people experience discomfort after stress has passed? In A. A. Harrison, Y. A. Clearwater, & C. P. McKay (Eds.), „From Antarctica to outer space: Life in isolation and confinement“, pp. 261–266. Springer.
9. Sokolov, Y. (2026). Neighbors in vacuum. „Nezavisimaya Gazeta“ (analysis of the psychology of closed collectives in space).
10. Yusupova, A. K. (IBMP RAS). Isolation: A space psychologist’s view (lectures and publications on results from SIRIUS and Mars-500).
11. Kanas, N., & Manzey, D. (2008). „Space psychology and psychiatry“ (2nd ed.). Springer.
12. White, F. (1987). „The Overview Effect: Space exploration and human evolution“. Houghton Mifflin.
13. The Debrief. (2026). Microgravity may mimic certain aspects of psychedelic brain states (based on Nezami & Ferrè, 2026).
14. Bubeev, Y. (2020). “In space there are all the conditions for altered states of consciousness.” „Kommersant“ (and subsequent interviews).
15. Palinkas, L. A., et al. (various years). Reviews on psychosocial adaptation in ICE environments, including data from Antarctic stations and simulations.
16. Pogled.info / CGTN. (2026, September 22). Traditional Chinese medicine supports China’s crewed space missions. https://pogled.info/svetoven/pogled-kitai/traditsionnata-kitayska-meditsina-podpomaga-pilotiranite-kosmicheski-misii-na-kitay.197637
17. NASA. (2018, August 30). International Space Station status. https://www.nasa.gov/blogs/spacestation/2018/08/30/international-space-station-status-3/
18. Pirovski, N., & Saghir, F. (2022). Altered states of consciousness – characteristics and use. „Science & Research, 6“(2), 64–76.
19. Aleksovski, J., Pirovski, N., & Georgieva, I. (2024). Risk in cyber environment. „Trakia Journal of Sciences, 22“(2), 4. https://doi.org/10.15547/tjs.2024.02.006

ETHICAL AND PHILOSOPHICAL DIMENSIONS OF HUMAN PRESENCE IN SPACE

Nikola Pirovski

Department of Anatomy, Faculty of Medicine, Trakia University, Stara Zagora, Bulgaria
e-mail: nikola.pirovski@trakia-uni.bg

Keywords: *space ethics, human presence, body, time, meaning, long-duration spaceflight*

Abstract: *Human presence in space is usually framed as a technical and organizational challenge: how to reach, survive, and accomplish the mission. This paper defends a more modest but fundamental thesis: even with flawless technical safety, human presence in space can be existentially threatened if the lived experience of body, time, and meaning is neglected. Materials and Methods: The analysis is conceptual and philosophical, drawing on phenomenological descriptions of bodily experience, temporality, and meaning, as well as on existing literature in space medicine and ethics. No new theoretical framework is proposed; the focus is on three concrete dimensions of human existence in space habitats. Results: First, the cosmic environment radically transforms the experience of the body. In microgravity, isolation, and constant dependence on life-support systems, the body shifts from "I can" to "I am being maintained," risking the transformation of the astronaut from a living subject into a functional component of the mission. Second, time in closed habitats tends to collapse into operational time: personal, biographical rhythm is subordinated to strict schedules and delayed communication with Earth. Third, in fully artificial environments where every gesture is regulated, questions of "why I am here" and "what I am doing with this life" become both more urgent and harder to articulate, leading to a quiet erosion of meaning. Discussion: These three dimensions body, time, and meaning show that existential risk accompanies technical risk. An astronaut may be physically safe yet existentially insecure if their embodiment, temporality, and sense of purpose are systematically undermined by the design of the mission and habitat. Conclusion: The ethical question of human presence in space should begin from these concrete experiences rather than from abstract principles. Attending to the lived body, personal time, and meaning does not guarantee mission success, but neglecting them makes any "safe" mission existentially precarious for the human being who inhabits it.*

ЕТИЧЕСКИ И ФИЛОСОФСКИ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЧОВЕШКОТО ПРИСЪСТВИЕ В КОСМОСА

Никола Пировски

Катедра по анатомия, Медицински факултет, Тракийски университет, Стара Загора, България
e-mail: nikola.pirovski@trakia-uni.bg

Ключови думи: *космическа етика, човешко присъствие, тяло, време, смисъл, продължителен космически полет*

Резюме: *Човешкото присъствие в космоса обикновено се формулира като техническо и организационно предизвикателство: как да се достигне, да се оцелее и да се изпълни мисията. Настоящият доклад защитава по-скромна, но фундаментална теза: дори при безупречна техническа безопасност човешкото присъствие в космоса може да бъде екзистенциално застрашено, ако се пренебрегва живият опит на тялото, времето и смисъла. Материали и методи: Анализът е концептуален и философски. Той се опира на феноменологични описания на телесния опит, темпоралността и смисъла, както и на съществуващата литература в областта на космическата медицина и етиката. Не се предлага нова теоретична рамка; фокусът е върху три конкретни измерения на човешкото съществуване в космическите хабитати. Резултати: Първо, космическата среда радикално трансформира опита на тялото. В условия на микрогравитация, изолация и постоянна зависимост от системите за поддържане на живота тялото преминава от модуса „аз мога“ към модуса „аз съм поддържан“, което крие риск астронавтът да се превърне от жив субект в функционален компонент на мисията. Второ, в затворените хабитати времето има тенденция да се срива до оперативно време: личният, биографичен ритъм се подчинява на строги графици и на забавената комуникация със Земята. Трето, в напълно изкуствена среда, в която всеки жест е регулиран, въпросите „защо съм тук“ и „какво правя с този живот“ стават едновременно по-належащи*

и по-трудни за артикулиране, което води до тиха ерозия на смисъла. Дискусия: Тези три измерения – тяло, време и смисъл – показват, че екзистенциалният риск съпътства техническия. Астронавтът може да е физически в безопасност, но да бъде екзистенциално несигурен, ако въплъщението, темпоралността и чувството за цел системно се подкопават от дизайна на мисията и хабитата. Заключение: Етичният въпрос за човешкото присъствие в космоса следва да започва от тези конкретни преживявания, а не от абстрактни принципи. Вниманието към живото тяло, личното време и смисъла не гарантира успех на мисията, но пренебрегването им прави всяка „безопасна“ мисия екзистенциално рискована за човека, който я обитава.

Introduction

Even when every technical system functions flawlessly, a deeper vulnerability remains. A person may be physically protected and yet lose the ordinary supports that make life recognizably human – a body that acts, a sense of lived time, and a durable feeling of meaning [1, 2].

In fact, the space environment does not merely “load” the human being. It reveals the extent to which our everyday existence is bound to weight, to the horizon, to the rhythm of day and night, and to the possibility of touching the ground. When these self-evident conditions fall away, the person confronts not only the question of how to survive, but of what remains of oneself as an embodied and temporal being. Here the issue is no longer merely adaptation, but the very possibility of preserving a human mode of existence [3].

The philosophical tradition of Russian cosmism has long placed this question in a wider horizon. For thinkers such as Tsiolkovsky and Fedorov, going into space is not simply a technical expansion of space, but a test of the very idea of the human – a being that bears responsibility not only for itself, but for life as a cosmic phenomenon. Bulgarian authors have likewise drawn attention to the “cosmic being of man” as a theme that requires a philosophical, and not only an engineering, approach [4, 5]. The ethics of presence in space begins long before the flight itself: it begins with the question of what it means to be human when the familiar terrestrial supports are removed.

In space the moral situation changes. Vulnerability is structural rather than accidental; dependence is built into the habitat itself; the possibility of fully informed consent is limited by uncertainty and by the hierarchical character of the mission [2, 6]. Beyond these practical difficulties stands a more fundamental philosophical question: what kind of human presence remains possible when the familiar supports of embodiment, time, and meaning are weakened or removed.

The present paper does not propose a new ethical system. It simply examines closely three dimensions of everyday existence in space habitats – the body, time, and meaning – and argues that neglecting them leaves even the safest mission existentially fragile for the people who must live in it. The ethical question of human presence in space therefore begins from the texture of this lived experience, and not solely from principles.

Materials and Methods

The present analysis is conceptual and philosophical. It does not rely on new empirical data, but on a phenomenological description of three fundamental dimensions of human existence in space habitats – bodily experience, temporality, and meaning.

The starting point is the understanding that prolonged residence in an artificial, closed, and technologically mediated environment changes not only physiology and psyche, but the very structures of everyday experience. The method therefore combines:

- a phenomenological approach to embodied and temporal being;
- an ethical analysis of vulnerability and responsibility under conditions of structural dependence;
- a dialogue with the traditions of space ethics and Russian cosmism, which regard the human being as a creature with a cosmic dimension.

No new theoretical system is proposed. The aim is to show how the concrete transformations of body, time, and meaning generate ethical questions that cannot be adequately captured by technical or biomedical safety criteria alone.

Results

Transformation of Bodily Experience

In terrestrial life the body is the primary medium of action and orientation. It rests on weight, senses the resistance of surfaces, and is constituted through the vertical. In microgravity this fundamental given is withdrawn. The body ceases to be a “place” from which one proceeds and becomes an object that must be continuously stabilized, monitored, and maintained by external systems.

This change has an ontological character. The person no longer experiences oneself primarily as an acting subject ("I can"), but as a being whose existence is mediated and dependent ("I am being maintained"). The ethical problem arises precisely here: to what extent can a mission claim success if it preserves biological functions while simultaneously eroding the experience of embodied autonomy? Bulgarian philosophical reflection has already framed the question of the "cosmic being of man" as a theme that transcends purely technical dimensions [4].

Compression and Depersonalization of Time

Temporality in the space habitat undergoes a radical reduction. On Earth time is saturated with qualitative differences – the alternation of day and night, seasons, social rituals, unforeseen events. In orbit or on an interplanetary voyage these markers disappear or turn into artificial conventions. What remains is the operational time of shifts, procedures, and delayed communication.

The consequence is not merely monotony, but a gradual depersonalization of biographical time. When the future is reduced to the repetition of the same cycles and the past grows ever more distant, the person risks losing the sense of one's own history. One continues to perform tasks, yet finds it increasingly difficult to connect those tasks with a wider horizon of meaning. The ethics of presence requires us to ask whether the habitat leaves space for personal time – for memory, for expectation, for projects that are not exhausted by the operational goals of the mission.

Crisis of Meaning

In a fully artificial and regulated environment the question of meaning acquires existential urgency. On Earth meaning is ordinarily sustained by a network of relations, places, traditions, and open possibilities. In space this network is radically reduced. What remains are the mission, the limited human community of the crew, and the distant image of Earth.

Some cosmonauts describe experiences of expanded perspective and deep connectedness. Others, however, encounter a gradually growing emptiness – a sense that life has been reduced to a set of functions. Philosophically speaking, the problem is not that meaning can be lost. The problem is that contemporary mission design rarely provides conditions in which meaning can be sustained, reworked, or newly created. If human presence in space is to be more than the successful functioning of biological organisms, it must also provide space for the meaningful constitution of existence.

These three transformations – of the body, of time, and of meaning – show that existential risk is not a side effect, but is intrinsic to the way long-duration missions are currently designed.

Discussion

The three dimensions – body, time, and meaning – show that existential risk is intrinsic to the way the human being is placed in an artificial and technologically mediated environment. The question is not only whether the astronaut survives, but what mode of being remains possible.

From the standpoint of the phenomenology of embodiment, the body is not an object among other objects. It is the "lived body" – the zero point of orientation from which the world discloses itself as a space of possible actions [10]. When gravity no longer supplies a stable vertical and every movement is mediated by the systems of the habitat, the experience of oneself as an acting subject weakens. The person continues to exist biologically, yet risks losing the primary sense of oneself as an embodied being who inhabits the world, rather than merely inhabiting a machine [3, 9].

Temporality undergoes a similar reduction. Biographical time – that which binds past, present, and future into a unified history – is subordinated to the operational rhythm. When days repeat without qualitative difference, the sense of one's own temporal density weakens. The person risks becoming a pure function of the schedule.

Meaning is the most difficult dimension to formalize. In an environment in which almost every action is predetermined, the question "why am I here" intensifies. Some experiences expand the horizon of meaning; others testify to a quiet erosion. The problem is not that meaning can be lost, but that mission design rarely provides conditions in which it can be sustained or newly created.

Russian cosmism has long placed this question in a wider horizon. For Fedorov and Tsiolkovsky, going into space is not merely a technical expansion, but a test of the very idea of the human as a being that bears responsibility not only for itself, but for life as a cosmic phenomenon [5, 6]. Hannah Arendt warns that space projects can deepen "earth alienation" – the tendency of the human being to flee the conditions of its terrestrial existence rather than to make sense of them [11].

Contemporary philosophical reflection on presence in space continues to raise the same questions with new urgency [12, 13]. If presence in space is thought of solely as a technical achievement, it risks missing what is most important: whether the human being there can still be human in the full existential sense of the word.

The experiences of body, time, and meaning associated with space are not the privilege of cosmonauts alone. To a certain degree they appear on Earth as well – among people whose daily schedules are so overloaded and technologically mediated that personal time shrinks to a sequence of tasks, the body is experienced primarily as an object of maintenance and optimization, and the question of meaning is deferred. The difference lies in intensity and in the impossibility of "stepping out": in orbit the problem cannot be postponed. That is precisely why space functions as a magnifying glass. It makes visible those transformations of experience that in everyday terrestrial life remain blurred and partially compensated.

Open questions remain to which the present analysis does not claim to give a final answer:

- What mode of being remains possible when the lived body and biographical time are systematically undermined by the environment?
- Can the ethics of presence in space begin from the concrete experience of embodiment, time, and meaning, rather than from principles derived solely under terrestrial conditions?

These questions do not require immediate solutions. They require to be posed – before missions, during them, and after them – if human presence in space is to be more than the successful functioning of biological organisms in a closed system.

Conclusion

Human presence in space is not exhausted by the technical possibility of reaching, surviving, and accomplishing the mission. It raises the question of what mode of existence remains possible when the familiar supports of body, time, and meaning are radically altered.

Attention to these three dimensions does not guarantee mission success. Neglecting them, however, renders any "safe" mission existentially precarious for the particular human being who must inhabit it. The ethics of presence in space therefore begins not from abstract principles, but from the texture of lived experience – and from the readiness to ask what remains human when the terrestrial self-evidences fall away.

Acknowledgements:

Trakia University scientific project: Assembly of Faith and Knowledge 19/2026

References:

1. Szocik, K. The Bioethics of Space Exploration. Oxford University Press, 2023.
2. Rajput, S., I. Mayor, M. Diamond, M. Rosenberg, V. Cole, N. Bhakare, O. Aziz and A. L. Wilder. Medical ethics of long-duration spaceflight. npj Microgravity, 9, 85, 2023.
3. Nezami, A. and E. R. Ferrè. Space Oddity: Microgravity as a neurocognitive catalyst for transformative consciousness experiences. Frontiers in Psychology, 17, 1769177, 2026.
4. Колева, Б. Философски размисъл за космическото битие на човека. Български философски преглед, 7, 162–172, 2017.
5. Tsiolkovsky, K. E. Kosmicheskaya filosofiya [Cosmic philosophy]. Original manuscript 1935; first published posthumously in Tekhnika – molodyozhi, 1981.).
6. Fedorov, N. F. Filosofiya obshchego dela [Philosophy of the common task]. Vols. 1–2, ed. V. A. Kozhevnikov and N. P. Peterson. Verny / Moscow, 1906–1913.
7. Kanas, N. and D. Manzey. Space Psychology and Psychiatry. 2nd ed. Springer, 2008.
8. White, F. The Overview Effect: Space Exploration and Human Evolution. Houghton Mifflin, 1987.
9. Jeevendrampillai, D. and A. Parkhurst. Towards an anthropology of gravity: Emotion and embodiment in microgravity environments. Emotion, Space and Society, 35, 100680, 2020.
10. Merleau-Ponty, M. Phenomenology of Perception. Routledge, 2012.
11. Arendt, H. The Human Condition. 2nd ed. University of Chicago Press, 1998.
12. Ushno, I. Homo Aerospace: Philosophical reflections on humanity's future in space. Philosophy and Cosmology, 33, 2024.
13. Garasic, M. D. and M. Di Paola (Eds.). The Philosophy of Outer Space. Routledge, 2024.

ВАРИАБИЛНОСТ НА СЪРДЕЧНАТА ЧЕСТОТА – ФИЗИОЛОГИЧЕН ИНДИКАТОР ПРИ ОЦЕНКА НА ОПЕРАТОРСКАТА ЕФЕКТИВНОСТ В ЕКСТРЕМНИ УСЛОВИЯ

Ара Хачмериян

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: arahachmeriyan@gmail.com

Ключови думи: *вариабилност на сърдечната честота, операторска ефективност, екстремни условия, стрес, изкуствен интелект, семантични модели*

Резюме: *Сложността на съвременните системи налага обективна оценка на функционалното състояние на операторите, работещи в екстремни условия. Вариабилността на сърдечната честота (ВСЧ) е неинвазивен показател на автономната регулация, който може да се регистрира в реално време. В статията са обобщени данни от научни публикации за промените във ВСЧ при екстремни условия (космически полет, полет на пилоти, хипоксия и високо когнитивно натоварване), както и възможностите за приложение на изкуствен интелект. Установено е, че при повишено натоварване и стрес показателите обикновено се изместват към намалена вариабилност и симпатиково преобладаване, че при пилоти по-високите стойности на SDNN и RMSSD са свързани с по-добро изпълнение, а при микрогравитация се променят предимно бавните компоненти на сигнала. Моделите на машинно обучение постигат двукласова точност над 90%, но обобщаемостта им е ограничена. Предложена е концептуална архитектура на семантичен модел с контекст, който съчетава онтология, машинно обучение и езиков модел за интерпретация на данните. ВСЧ е ценен компонент на комплексна система от индикатори, но не е достатъчен самостоятелен критерий за операторска ефективност.*

HEART RATE VARIABILITY – A PHYSIOLOGICAL INDICATOR FOR ASSESSING OPERATOR PERFORMANCE IN EXTREME ENVIRONMENTS

Ara Hachmeriyan

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: arahachmeriyan@gmail.com

Keywords: *heart rate variability, operator performance, extreme environments, stress, artificial intelligence, semantic models.*

Abstract: *The growing complexity of modern systems calls for an objective assessment of the functional state of operators working in extreme environments. Heart rate variability (HRV) is a non-invasive indicator of autonomic regulation that can be recorded in real time. This paper reviews published data on HRV changes under extreme conditions (spaceflight, pilot flight, hypoxia, and high cognitive workload), as well as the potential applications of artificial intelligence. The review shows that increased workload and stress are typically associated with reduced variability and sympathetic predominance, that in pilots higher SDNN and RMSSD values are associated with better performance, and that microgravity mainly alters the slow components of the signal. Machine learning models achieve binary classification accuracy above 90%, but their generalizability remains limited. A conceptual architecture for a context-aware semantic model is proposed, combining an ontology, machine learning, and a language model for data interpretation. HRV is a valuable component of a comprehensive system of indicators, but on its own is not a sufficient criterion for operator performance.*

Увод

Сложността на съвременните технически системи непрекъснато нараства, като контролът и управлението им се концентрират върху реакциите на един оператор или на група оператори. Когато работата се извършва в екстремни условия – космически полет, високо-маневрена авиация, хипоксия, изолация, топлинен или студов стрес – човешката грешка

може да застраши не само оператора, но и голям брой хора. Това налага непрекъснато усъвършенстване на методите за психофизиологична оценка чрез въвеждане на нови и утвърдени показатели за състоянието на индивида, които могат да се регистрират обективно, неинвазивно и в реално време [1].

Един от най-често използваните показатели е вариабилността на сърдечната честота (ВСЧ), която отразява колебанията на интервалите между последователни сърдечни съкращения. Тя е резултат от взаимодействието между симпатиковата и парасимпатиковата част на вегетативната нервна система и от регулаторните въздействия на по-високите нива на централната нервна система върху синусовия възел. Методиката за измерване, физиологичната интерпретация и клиничното приложение на този показател са стандартизирани в становището на работна група на Европейското кардиологично дружество (ЕКД) и Северноамериканското дружество по стимулация и електрофизиология (NASPE) [2]. Оттогава ВСЧ е предмет на голям брой изследвания във връзка със стреса [3], когнитивното натоварване [4] и умората на оператори.

Прегледът на научната литература показва, че резултатите не са еднозначни. Систематичен преглед на 29 рецензирани публикации за оценка на умственото натоварване на пилоти чрез ВСЧ констатира значителна разнородност между отделните проучвания, като най-чувствителен към изменението на натоварването се оказва по-скоро самият сърдечен ритъм, отколкото част от показателите за вариабилност [4]. Същият преглед посочва малки извадки, преобладаване на симулаторни условия и липса на стандартизирана оценка на натоварването. Тези особености пречат на ВСЧ да бъде използвана като самостоятелен и валиден индикатор за операторска ефективност.

Въз основа на анализа на разгледаните публикации в настоящата статия са систематизирани ограниченията при използването на ВСЧ като самостоятелен индикатор за операторска ефективност при екстремни условия. Анализирани са факторите, които влияят върху интерпретацията на показателите на ВСЧ, и е формулирана концептуална архитектура на контекстно-зависим семантичен модел, интегриращ физиологични показатели, контекст на работната ситуация, машинно обучение и езиков модел за интерпретация на резултатите.

В настоящата статия тези понятия се разграничават, тъй като често се използват взаимозаменяемо в литературата. Физиологичното състояние е обективно измерима величина (напр. чрез ВСЧ), докато стресът и менталното натоварване при изпълнение на задачата са фактори на средата, които го променят [5]. Операторската ефективност е резултатната променлива – степента, в която операторът изпълнява поставената задача – и не се извежда пряко от физиологичното състояние, а зависи и от регулаторните механизми, чрез които операторът се справя с натоварването, както и от индивидуални и ситуационни фактори [6].

Материал и методи

Изследването е осъществено като наративен преглед на научни източници с отворен достъп. Търсенето е проведено през уеб търсачки и платформи за научни публикации (PubMed, PMC, Frontiers, MDPI, Springer, ScienceDirect, Nature) с ключови думи на английски език: *heart rate variability*, *spaceflight*, *military pilots*, *mental workload*, *stress*, *operator performance* и *machine learning*. Предпочетени са систематични прегледи, метаанализи, стандартизационни документи и оригинални изследвания с участие на астронавти, пилоти и други оператори. Работата с източниците е ограничена до достъпните резюмета и пълнотекстови статии, а количествените данни са взети директно от цитираните публикации. Не е прилагано ограничение по период на публикуване. Включени са рецензирани публикации на английски език, съдържащи количествени данни за ВСЧ при хора в операторска, авиационна, космическа или друга екстремна среда. Изключени са изследвания само върху животни, публикации без достъп до пълен текст или резюме и материали без количествени показатели за ВСЧ.

Физиологична основа

Вариабилността на сърдечната честота се определя от модулиращото влияние от двата клона на вегетативната нервна система върху синусовия възел. Според модела на невровисцералната интеграция, предложен от Thayer и съавт., индивидуалните различия във ВСЧ са свързани с изпълнението на задачи, изискващи изпълнителни функции и активност на префронталния кортекс, а повишаването на ВСЧ в покой води до измерими промени в изпълнителните функции [7]. Тази връзка е физиологичната основа за използването на ВСЧ като индикатор за операторска ефективност.

Показатели за ВСЧ

Стандартните показатели са дефинирани в документа на работната група на ЕКД и NASPE от 1996 г. [2] и са обобщени с нормативни стойности в прегледа на Shaffer и Ginsberg [8]. Основните от тях са представени в Таблица 1.

Таблица 1. Основни показатели за ВСЧ. Източници: [2, 8].

Показател	Област	Мярка	Физиологична интерпретация
SDNN	времева	ms	обща вариабилност; при 24-часов запис – основен показател за сърдечен риск
RMSSD	времева	ms	краткосрочна вариабилност; отразява вагусова активност
pNN50	времева	%	дял на интервалите с разлика над 50 ms; корелира с парасимпатиковата активност
VLF	честотна	ms²	0,0033-0,04 Hz; спорна физиологична интерпретация
LF	честотна	ms²	0,04-0,15 Hz; смесено симпатиково и парасимпатиково влияние
HF	честотна	ms²	0,15-0,40 Hz; дихателно свързана вагусова активност
LF/HF	честотна	-	често тълкувано като симпато-вагусов баланс; валидността му е оспорвана
SD1, SD2	нелинейна	ms	SD1 съответства на RMSSD; SD2 - на дългосрочната вариабилност
SampEn	нелинейна	-	регулярност и сложност на сигнала; изчислима и от по-малко от 200 точки

Съкращения

В текста и в таблиците са използвани следните съкращения: ВСЧ – вариабилност на сърдечната честота; ЕКГ – електрокардиограма; HR (heart rate) – сърдечна честота; RR (NN) интервал – времето между два съседни R зъбеца на ЕКГ (при NN – само между нормални съкращения); SDNN (standard deviation of NN intervals) – стандартно отклонение на NN интервалите; RMSSD (root mean square of successive differences) – корен квадратен от средния квадрат на разликите между съседни NN интервали; pNN50 – процент на съседните NN интервали с разлика над 50 ms; VLF, LF и HF (very low, low и high frequency) – спектрална мощност в много ниско-, ниско- и високочестотния диапазон, а ULF (ultra low frequency) – в ултраниския диапазон; LF/HF – отношение между LF и HF; SD1 и SD2 – съответно късата и дългата ос на елипсата на диаграмата на Поанкаре; SampEn (sample entropy) – мярка за регулярност и сложност на сигнала; β – наклон на степенната зависимост в спектъра на ВСЧ; QRS комплекс – вълна на ЕКГ, съответстваща на деполяризацията на камерите.

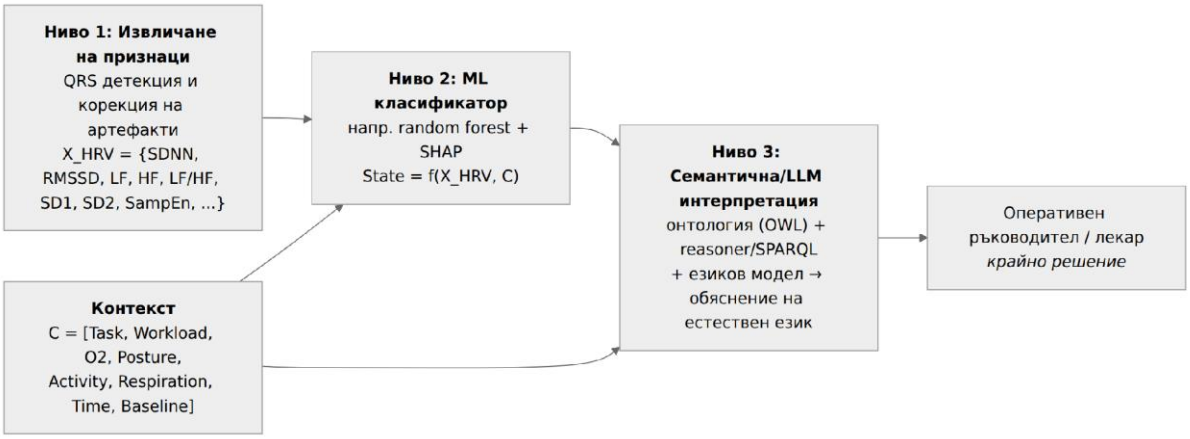
Трябва да се отбележи, че LF не е чист индекс на симпатиковата активност, тъй като около половината от нея отразява парасимпатикови влияния, а взаимодействието между двата клона често не е реципрочно [8]. Затова коефициентът LF/HF следва да се тълкува с повишено внимание, особено в условия на движение и променливо дишане.

Изисквания към записа

Стандартът разграничава краткосрочен запис от около 5 минути в контролирани условия и 24-часов амбулаторен запис [2]. В литературата се използва и ултракраткосрочен запис под 5 минути [8]. Стойностите, получени при различна продължителност, не са взаимозаменяеми. Например при краткосрочен запис при възрастни (n = 21 438) средните стойности са SDNN 50 ms (SD 16), RMSSD 42 ms (SD 15) и LF/HF 2,8 (SD 2,6), докато 24-часовите норми са различни [8]. На интерпретацията влияят дължината на записа, методът за регистрация (ЕКГ или фотоплетизмография), честотата на дискретизация, премахването на артефакти, честотата на дишането, възрастта, полът и положението на тялото [8]. При регистрация в реални оперативни условия, в които артефактите от движение са по-чести, качеството на детекцията на QRS комплексите и коригирането на ектопичните удари са особено важни [9].

Семантичен модел с контекст за интерпретация на данните

Наред с класическите показатели за ВСЧ е разгледана концептуална архитектура за анализ на данните с изкуствен интелект, която добавя към числовите данни и контекста, в който са получени. Архитектурата е предложена в контекста на прегледаната литература и не е валидирана експериментално. Тя се състои от три нива (Фиг. 1).



Фиг. 1. Концептуална архитектура на семантичен модел с контекст за анализ на ВСЧ

Първото ниво извлича признаците на ВСЧ. Надеждната детекция на QRS комплексите и коригирането на ектопичните удари са предпоставка за това ниво, тъй като дори единичен грешен интервал изкривява показателите за краткосрочна вариабилност [9].

Признаковият вектор X_{HRV} обединява показателите от Таблица 1:

(1) $$X_{HRV} = \{SDNN, RMSSD, pNN50, LF, HF, LF/HF, SD1, SD2, SampEn, \dots\}$$

а контекстният вектор C обхваща факторите на работната ситуация:

(2) $$C = [Task, Workload, O2, Posture, Activity, Respiration, Time, Baseline]$$

Тези компоненти описват вида на задачата, нивото на екстремния фактор, положение и двигателна активност, честота на дишане, време от началото на смяната и индивидуалната базова линия на оператора; именно тези фактори определят как се тълкуват числата [8].

Второто ниво е класификатор на машинно обучение, който съпоставя състоянието на оператора със стойността:

(3) $$State = f(X_{HRV}, C)$$

оценка на физиологичното/натовареното състояние на оператора. Като пример е използван random forest, приложен върху OWL онтология на признаците на ВСЧ с проверка на логическата съвместимост чрез reasoner и заявки на езика SPARQL [10]; други класически или дълбоки модели (например SVM, k-NN, LSTM) биха могли да заместят random forest без промяна в архитектурата, а резултатите се придружават от методи за обяснимост (SHAP), за да е ясно кой признак води до какво заключение [10].

Третото ниво е семантична/LLM интерпретация: езиков модел получава State, контекста C и факти от онтологията и генерира обяснение на естествен език, като отбелязва несигурността на заключението. Тази стъпка е нужна, защото езиковите модели имат трудности с времеви редове и са склонни към правдоподобни, но неверни изводи [11]; затова той се опира само на подготвените от предходните нива данни, а крайното решение остава за оперативния ръководител или лекар. Операторската ефективност се дефинира хипотетично като:

(4) $$Performance = g(State, C).$$

Тази връзка не се извежда директно от архитектурата, а остава задача на бъдеща валидация. Оценката на такава система би изисквала три критерия: съвпадение на класификацията с експертна оценка, валидация върху данни от нови участници [12] и последователност на обясненията с правилата в онтологията.

Резултати

Вариабилност на сърдечната честота при екстремни условия

Данните от космическите полети показват, че микрогравитацията променя структурата на ВСЧ, но не по начина, който бихме очаквали при класическа симпатикова активация. При 7 астронавти на борда на Международната космическа станция (средна продължителност на полета 172,6 ± 14,6 дни) показателят за степенно мащабиране β е по-малко отрицателен в космоса (−0,949 ± 0,061), отколкото на Земята (−1,163 ± 0,075), като промяната се появява до един месец и не се възстановява през целия полет [13]. Мощността в ултрависката честотна област намалява с 22–52% и 13–54% в различните подпериоди, а HF и LF компонентите не се

променят значимо [13]. При друга група от 10 астронавти при шестмесечен престой на станцията общата спектрална мощност нараства от 154,9 ± 105,0 на 532,7 ± 301,3 ms², ултраниската мощност – от 117,9 ± 57,5 на 442,4 ± 202,9 ms², а амплитудата на ритъма с период около 90 минути се утроява спрямо земните условия [14]. Двете изследвания се различават по използваните спектрални периоди и по състава на групите, което обяснява до известна степен противоположната посока на изменението на ултраниските компоненти и налага предпазливост при обобщаването.

При военни пилоти обхватен преглед на 19 изследвания съобщава за повишена сърдечна честота и намалени RR интервали по време на полет, с понижение на RMSSD с 42–56%, намаляване на SDNN и SD1/SD2 и повишаване на LF/HF – промени, интерпретирани традиционно като изместване към преобладаваща симпатикова активност [15]. Част от показателите остават променени до 5 часа след приземяването [15]. При пилоти на пътнически самолети, летящи на симулатор на Airbus A320, средните стойности са SDNN 34,1 ± 12,7 ms, RMSSD 23,8 ± 10,2 ms и LF/HF 5,7 ± 2,8, а вариабилността е по-ниска при излитане и кацане, отколкото при полет на маршрутна височина [16].

Съчетанието на хипоксия и висока когнитивна натовареност е изследвано при 24 здрави участници, изложени на 14,0% кислород (хипоксия) или 21,0% кислород (нормоксия) при задачи с ниска и висока сложност [17]. При сложни задачи и хипоксия SDNN намалява с 13,6 ± 14,6 ms, докато при нормоксия промяната е само −0,3 ± 1,4 ms; разликата между условията е 13,3 ms ($p < 0,0001$) [17]. При ниско натоварване не се наблюдава влошаване, а дори тенденция към възстановяване на автономната активност [17]. Тези данни показват, че ефектите на кислородния дефицит и на умственото натоварване върху ВСЧ се проявяват най-ясно тогава, когато действат едновременно. Данните от разгледаните изследвания са обобщени в Таблица 2.

Таблица 2. Промени във ВСЧ при екстремни фактори (сравнение по данни от публикации)

Условие	Изследване	Участници	Продължителност/ протокол/метод	Основни данни	Ограничения
Космически полет, ~ 6 мес.	Otsuka и съавт., 2015 [13] – обсервационно, надлъжно	7 астронавти	5 записа по 24 ч. (преди, 3× по време, след полета); двуканален Holter ЕКГ	β: −0,949 в космоса срещу −1,163 на Земята; ULF ↓ 22–52%	изключени 3 астронавти поради непълни записи; липсват данни за медикация
Космически полет, ~ 6 мес.	Otsuka и съавт., 2016 [14] – обсервационно, надлъжно	10 астронавти	5 записа по 24 ч. (преди, ~21/73/153-и ден, след полета); двуканален Holter ЕКГ	Обща мощност 154,9 → 532,7 ms²; 90-мин. амплитуда ×3	технически дефект в един базов запис; голяма междуиндивидуална вариабилност
Полет на военни пилоти	обхватен преглед [15] – PRISMA-ScR, 19 изследвания	19 изследвания (реални и симулирани полети)	разнородни протоколи по отделните изследвания; времеви, честотни и нелинейни показатели, различни устройства	RMSSD ↓ 42–56%; LF/HF ↑; ефект до 5 ч. след кацане	висока методологична хетерогенност; малки извадки в повечето изследвания
Симулатор, пилоти на A320	Cao и съавт., 2019 [16] – кръстосано проучване с повторни измервания	30 пилоти	3 симулационни полета (~3 ч. всеки), различни нива на CO_2; гръден ЕКГ сензор (Movisens EcgMove3)	SDNN – 34,1 ms; RMSSD 23,8 ms; LF/HF 5,7	само мъже пилоти; базовите стойности повлияни от очакван стрес
Хипоксия (14% O_2) и висока натовареност	Temme и съавт., 2024 [17] – пост-хок анализ на смесен двуфакторен експеримент	24 участници	два 2-часови сеанса; анализирани сесии по 27 мин; гръдна лента (Warfighter Monitor, ЕКГ)	SDNN − 13,6 ms; разлика спрямо нормоксия 13,3 ms	лабораторни условия без реален риск; не могат да се разделят ефектите на последователните задачи

Вариабилност на сърдечната честота, натоварване и операторска ефективност

Метаанализ на 37 изследвания, обхващащ различни методи за индуциране на стрес, посочва, че най-често се съобщава за намалена парасимпатикова активност, характеризираща се с намалена HF и повишена LF, със снижаване на SDNN и повишаване на LF/HF [18]. Същевременно авторите отбелязват разнородност на задачите, нееднакви методи за измерване и непоследователна статистическа значимост [18]. Систематичен преглед на умственото натоварване на пилоти установява подобни резултати: при повишено натоварване сърдечната честота нараства, SDNN намалява, HF предимно намалява, а при RMSSD и LF/HF резултатите са разнопосочни или статистически незначими; особено забележимо е, че самата сърдечна честота се оказва по-чувствителна от показателите за вариабилност [4]. Това насочва към извода, че ВСЧ е най-ценна като част от набор от показатели, а не като единствен индикатор.

Най-директната връзка с ефективността на изпълнение показва изследване на 30 пилоти на пътнически самолети при полет на симулатор. Повишаване на SDNN с 21,97 ms (междуквартилна разлика) е свързано с 37% по-високи шансове за успешно изпълнение, повишаване на RMSSD с 16,00 ms – с 22%, а намаляване на LF/HF с 4,69 – с 20% [16]. Ниската вариабилност е свързана с възрастта, телесното тегло и трудните маневри, а при отделни фази на полета (излитане, кацане) се регистрира по-изразен стрес [16]. Връзката между ВСЧ и ефективност е предвидена и от модела на невровисцералната интеграция, според който изкуственото повишаване на ВСЧ в покой променя изпълнителните функции [7].

Възможностите за еднокритерийна оценка са ограничени, затова в практиката се предпочитат комплексни системи. В изследователския комплекс „BeOn-1“, разработен в ИКИТ-БАН за оценка на ситуационна бдителност на авиационни специалисти, резултатите от тестовете се анализират заедно с ред физиологични параметри, които служат като индикатори за психофизиологичното състояние, включително ефективността на индивидуалната стратегия за справяне със стрес [19]. Комплексът регистрира ЕКГ, пулсова вълна, артериално налягане чрез времето на пулсово разпространение, кожна проводимост и температура в четири точки на тялото, като тестовете се изпълняват едновременно върху нестабилна платформа [19]. В по-новите изследвания на Института са описани и подходи за подбор на оператори на безпилотни летателни апарати чрез проследяване на погледа и безжична електроенцефалография за оценка на визуалното внимание и менталното натоварване [20]. Така показателите от ВСЧ могат да бъдат съпоставени с поведенчески (точност, време за реакция), визуални и неврофизиологични показатели в една система.

Възможности за използване на изкуствен интелект

Анализът на ВСЧ с методи на машинното обучение се разглежда като начин да се преодолеят ограниченията на отделните показатели чрез едновременно отчитане на много признаци. Систематичен преглед на 43 публикации за прогнозиране на стрес чрез ВСЧ и изкуствен интелект разграничава три групи подходи: системи, основани на правила (fuzzy logic, neuro-fuzzy networks), класическо машинно обучение (SVM – support vector machine, k-nearest neighbours (k-NN), random forest, decision trees) и дълбоко обучение (LSTM – long short-term memory, CNN – convolutional neural network) [21]. Съобщаваната точност при класическите методи варира от 57% до 100%, като при SVM често надхвърля 99% при разграничаване на състояния [21]. Като типичен набор от данни се използва SWELL-KW (2688 записа), а изследванията включват от 5 до 100 участници [21].

Използването на такива системи при оператори в реална среда е в начален етап на разработване. От 29 публикации за ВСЧ и умствено натоварване на пилоти само в осем са описани системи за автоматично разпознаване на промяна във физиологичните параметри [4]. Двукласовото разграничаване (ниско срещу високо натоварване) надхвърля 90% точност в най-добрите случаи, докато при три класа точността пада под 50% [4]. Най-добри резултати постигат SVM и multilayer perceptron (MLP), а индивидуалните модели превъзхождат груповите [4]. Същият преглед обаче отчита, че по-голямата част от изследванията са проведени със 7–35 участници, две трети от тях в симулатори, а методите за валидиране често не са описани [4].

Проблемът с обобщаването на данните е основен. Систематичен преглед на машинното обучение върху данни от носими устройства установява недостатъци в протоколите за етикетиране, липса на статистическа мощ, съмнения във валидността на биомаркерите за стрес и слаба способност за обобщаване, като стресовият отговор се проявява различно при различните хора [12]. Затова високите стойности на точност, публикувани върху отделни набори от данни, не могат директно да се пренесат към оперативни условия. За реална употреба са необходими индивидуална калибровка, стандартизирани протоколи за оценка и обяснимост на моделите [12, 21], а в реални условия и надеждна детекция на QRS комплексите при наличие на шум и артефакти, което е самостоятелна инженерна задача [9].

Друга насока е добавянето на семантичен контекст към данните за ВСЧ. При онтологичния подход Chatterjee и съавт. създават OWL онтология за признаците за ВСЧ върху набора от данни SWELL-KW (410 322 записа, 34 признака), която позволява SPARQL заявки и проверка на логическата съвместимост; с random forest точността е 97,9%, а след оптимизиране на признаците с genetic algorithm достига 99,4%, като резултатите се обясняват чрез SHAP [10]. Авторите отбелязват ограничението на единствен набор от данни, затова тази точност не може да се счита за доказателство за обобщаване (виж [12]). Добавянето на контекст (демографски данни, здравни знания, времева информация) към данните, подавани на езиков модел, подобрява резултатите с до 23,8% при четири публични набора и 10 задачи [22], а агент на базата на езиков модел, който генерира код на Python за анализ на времеви редове от носими устройства, дава верен отговор на 84% от обективните въпроси срещу 74% при базовия модел, но е тестван със синтетични данни [23]. Модулна система за обработка, в която ВСЧ от гръден пояс се обработва в реално време и се подава на GPT-4, показва различна автономна реакция при ниско и високо когнитивно натоварване, но е тествана само в двучасова пилотна сесия и все още без вградени мерки за защита на личните данни [24]. Прегледите на езиковите модели при носими сензори отбелязват и риск от неверни отговори, трудности с анализа на времеви редове и проблеми с поверителността на данните [11]. Нито едно от описаните решения не е проверено върху оператори, работещи в екстремни условия.

Дискусия и заключение

Прегледът потвърждава, че ВСЧ е чувствителна към две главни категории фактори – натоварване и стрес от една страна и екстремна среда от друга – но отговорът зависи от конкретния фактор и от избрания показател. При полет на пилоти и при сложни задачи повечето изследвания докладват за намалена вариабилност и промени, интерпретирани традиционно като симпатиково преобладаване [15, 18], но при космически полет промените се отнасят предимно към бавните компоненти и към мащабните свойства на сигнала, а не към HF и LF [13, 14]. Причината е, че нито един показател не е чист индекс на симпатикова активност [8], а връзката между натоварването и автономния отговор е опосредствана от дишане, поза, възраст, телесно тегло и други фактори [8, 16, 18].

Валидността на ВСЧ като индикатор за операторска ефективност е ограничена от няколко обстоятелства. Първо, извадките са малки – от едва 5 до 100 участници, преобладаващо до 35 [4, 21]. Второ, повечето данни са от симулатори и лаборатории, където липсват реалните рискове [4, 15]. Трето, няма единен критерий за натоварване и ефективност, който да се прилага навсякъде [4, 18]. Следва да се посочи и че двете изследвания на астронавти [13, 14] имат различни групи и спектрални периоди, така че техните резултати не могат да се сравняват директно.

Изследванията определят операторската ефективност чрез различни оперативни критерии. При Cao и съавт. [16] тя е бинарен резултат (успешно/неуспешно изпълнение на маневра), оценен от сертифицирани изпитващи по стандартизиран протокол; в комплекса „BeOn-1“ [19] тя се извежда от точността и времето за реакция в тестова батерия за ситуационна бдителност; в систематичния преглед на Wang и съавт. [4] отделните изследвания използват разнородни критерии – експериментално манипулирана трудност на задачата, субективни скали за натоварване (напр. NASA-TLX) или брой грешки. Тази разнородност на критерия за ефективност е самостоятелно ограничение, отделно от разнородността на самите ВСЧ показатели, и затруднява директното сравняване на резултатите между изследванията. За бъдеща валидация се предлага операторската ефективност да се дефинира спрямо независим, предварително зададен критерий за изпълнение на задачата – например процент точно изпълнени елементи от задачата, при който високи стойности например процент точно изпълнени елементи от задачата и/или брой и тежест на допуснатите грешки (напр. около 95%) отговарят на ниско или нормално натоварване, а съществено занижени стойности (напр. около 70%) или нарастващ брой грешки – на нарушена операторска ефективност. Конкретните прагове следва да бъдат определени чрез експериментална валидация. Въз основа на прегледаната литература могат да бъдат предложени поне четири условия за практическото използване на ВСЧ като индикатор за операторска ефективност: (1) стандартизиран протокол за запис според изискванията на [2]; (2) индивидуална базова линия за всеки оператор; (3) комбиниране на ВСЧ с поведенчески и неврофизиологични показатели [19, 20]; (4) валидация на моделите за изкуствен интелект върху данни от нови участници и реални оперативни условия [12, 21].

Изводи

Вариабилността на сърдечната честота е обективен, неинвазивен и лесно регистрируем показател на автономното състояние, който при пилоти и астронавти реагира на натоварване, хипоксия и микрогравитация. Връзката с ефективността на изпълнение е доказана в симулаторни условия, но не е достатъчно стабилна, за да бъде използвана самостоятелно. Най-обосновано е ВСЧ да се разглежда като компонент на комплексна система от индикатори,

която се калибрира индивидуално. Изкуственият интелект предлага перспектива за многопризнаков анализ, но за практическо приложение е нужна валидация върху по-големи и по-разнообразни извадки от оператори. Семантичният модел с контекст е перспективна посока, защото свързва числовите данни с конкретните условия и прави заключенията проверими, но до валидирането му в експериментална среда остава концептуално предложение.

Литература:

1. Sawka, M. N., K. E. Friedl. Emerging Wearable Physiological Monitoring Technologies and Decision Aids for Health and Performance, Journal of Applied Physiology, 2018, 124(2), 430–431. DOI: 10.1152/japplphysiol.00964.2017.
2. Malik, M., J. T. Bigger, A. J. Camm et al. Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use, European Heart Journal, 1996, 17(3), 354–381. DOI: 10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868.
3. Järvelin-Pasanen, S., S. Sinikallio, M. P. Tarvainen. Heart Rate Variability and Occupational Stress – Systematic Review, Industrial Health, 2018, 56(6), 500–511. DOI: 10.2486/indhealth.2017-0190.
4. Wang, P., R. Houghton, A. Majumdar. Detecting and Predicting Pilot Mental Workload Using Heart Rate Variability: A Systematic Review, Sensors, 2024, 24(12), 3723. DOI: 10.3390/s24123723.
5. Longo, L., C. D. Wickens, G. Hancock, P. A. Hancock. Human Mental Workload: A Survey and a Novel Inclusive Definition, Frontiers in Psychology, 2022, 13, 883321. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.883321.
6. Hockey, G. R. J. Compensatory Control in the Regulation of Human Performance under Stress and High Workload: A Cognitive-Energetical Framework, Biological Psychology, 1997, 45(1–3), 73–93. DOI: 10.1016/S0301-0511(96)05223-4.
7. Thayer, J. F., A. L. Hansen, E. Saus-Rose, B. H. Johnsen. Heart Rate Variability, Prefrontal Neural Function, and Cognitive Performance: The Neurovisceral Integration Perspective on Self-regulation, Adaptation, and Health, Annals of Behavioral Medicine, 2009, 37(2), 141–153. DOI: 10.1007/s12160-009-9101-z.
8. Shaffer, F., J. P. Ginsberg. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms, Frontiers in Public Health, 2017, 5, 258. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258.
9. Tanev, S. Ventricular Beat Detection and Classification in Long Term ECG Recordings, International Journal Bioautomation, 2012, 16(4), 273–290.
10. Chatterjee, A., M. A. Riegler, K. Ganesh, P. Halvorsen. Stress Management with HRV Following AI, Semantic Ontology, Genetic Algorithm and Tree Explainer, Scientific Reports, 2025, 15, 5755. DOI: 10.1038/s41598-025-87510-w.
11. Farrahi, V. The Rise of Large Language Models in Wearable Health Sensing, Intelligent Medicine, 2026, 6(3), 285–291. DOI: 10.1016/j.imed.2025.12.003.
12. Vos, G., K. Trinh, Z. Sarnyai, M. Rahimi Azghadi. Generalizable Machine Learning for Stress Monitoring from Wearable Devices: A Systematic Literature Review, International Journal of Medical Informatics, 2023, 173, 105026. DOI: 10.1016/j.ijmedinf.2023.105026.
13. Otsuka, K., G. Cornelissen, Y. Kubo et al. Intrinsic Cardiovascular Autonomic Regulatory System of Astronauts Exposed Long-term to Microgravity in Space: Observational Study, npj Microgravity, 2015, 1, 15018. DOI: 10.1038/npjmgrav.2015.18.
14. Otsuka, K., G. Cornelissen, S. Furukawa et al. Long-term Exposure to Space's Microgravity Alters the Time Structure of Heart Rate Variability of Astronauts, Heliyon, 2016, 2(12), e00211. DOI: 10.1016/j.heliyon.2016.e00211.
15. Soares, A. B. F., M. F. de Almeida, E. Franchini, F. G. Ferreira, F. A. D. Campos. Heart Rate Variability in Military Pilots During Flight: A Scoping Review, Military Medicine, 2024, 190(3–4), e515–e522.
16. Cao, X., P. MacNaughton, L. R. Cadet et al. Heart Rate Variability and Performance of Commercial Airline Pilots during Flight Simulations, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(2), 237. DOI: 10.3390/ijerph16020237.
17. Temme, L. A., H. L. Wittels, M. J. Wishon et al. Examining the Influence of Cognitive Load and Environmental Conditions on Autonomic Nervous System Response in Military Aircrew: A Hypoxia–Normoxia Study, Biology, 2024, 13(5), 343. DOI: 10.3390/biology13050343.
18. Kim, H.-G., E.-J. Cheon, D.-S. Bai, Y. H. Lee, B.-H. Koo. Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature, Psychiatry Investigation, 2018, 15(3), 235–245.
19. Tanev, S., P. Trendafilov, H. Hristov et al. Scientific Research Complex "BeOn-1" Performance Indicator of the Operators in Extreme Conditions, Journal of Earth Science and Engineering, 2014, 4(11), 675–683. DOI: 10.17265/2159-581X/2014.11.003.
20. Hubenova, Z., S. Tanev. Bulgarian Contribution to Research of Human Factors in Space, Aerospace Research in Bulgaria, 2025, 37, 163–174. DOI: https://doi.org/10.3897/arb.v37.e16.
21. Haque, Y., R. S. Zawad, C. S. A. Rony et al. State-of-the-Art of Stress Prediction from Heart Rate Variability Using Artificial Intelligence, Cognitive Computation, 2024, 16(2), 455–481.
22. Kim, Y., X. Xu, D. McDuff, C. Breazeal, H. W. Park. Health-LLM: Large Language Models for Health Prediction via Wearable Sensor Data, Proceedings of Machine Learning Research, 2024, 248 (Conference on Health, Inference, and Learning).
23. Merrill, M. A., A. Paruchuri, N. Rezaei et al. Transforming Wearable Data into Personal Health Insights Using Large Language Model Agents, Nature Communications, 2026, 17, 1143.
24. Gellisch, M., B. Burr. Establishing a Real-Time Biomarker-to-LLM Interface: A Modular Pipeline for HRV Signal Acquisition, Processing, and Physiological State Interpretation via Generative AI, Frontiers in Digital Health, 2025, 7.

НАЙ-РАННИТЕ ПРИРОДНИ НАУКИ, ИНОВАЦИИ И МЕДИЦИНА В ЕВРОПА

Роксандра Памукова-Майкълсън

Съюз на изобретателите в България (СИБ)
e-mail: r.pamukova@foz.mu-sofia.bg

Ключови думи: *Дунавска цивилизация, астрономическа обсерватория, медицина, природни науки, иновации*

Резюме: *Първата европейска цивилизация, известна в научната литература като Дунавска цивилизация, възниква в Югоизточна Европа около VII хилядолетие пр.н.е. От особено значение за нейното развитие е иновативният регион, разположен на територията на днешна България. Той се характеризира със забележителен културен напредък. Сред иновативните му приноси изпъква създаването на най-ранната в света комплексна металургия на златото и медта.*

Наскоро открити артефакти разкриват забележителни иновации, свързани със зараждането на редица съвременни природни науки. Те оказват значително влияние върху европейската цивилизация в продължение на хилядолетия – чак до наши дни

Сред тях са първите астрономически обсерватории, европейски градове със санитарни съоръжения, напреднала медицина и много други. Те разкриват значимите постижения на древните траки (трако-пеласги) – хилядолетия преди цивилизациите на Месопотамия, Египет и по-късна Гърция. Техният новаторски принос към съвременните природни науки, медицината и астрономията е от съществено значение за развитието на човечеството.

Епохата е известна в научната литература като „Златните хилядолетия“ (Гимбутас, 1981), тъй като хората са живеели в мир [21]. Без заплахата от военни конфликти, Дунавската цивилизация е успяла да развие изключително иновативни системи в областта на медицината, агрономията и наблюдението на космоса.

THE EARLIEST NATURAL SCIENCES, INNOVATIONS AND MEDICINE IN EUROPE

Roxandra Pamukoff-Michelson

Union of Inventors of Bulgaria (UIB)
E-mail: r.pamukova@foz.mu-sofia.bg

Key words: *Danube civilisation, astronomical observatory, medicine, natural sciences, innovations*

Abstract: *The first European civilisation, known in the literature as the Danube civilisation, emerged in Southeast Europe around 7th millennium BC. Of particular significance for its development is the innovative centre, situated in present day Bulgaria. It was marked by remarkable cultural stability, natural sciences, astronomical observatories, advanced medicine, sophisticated artistic production, and the world's earliest complex gold and copper metallurgy.*

Recently discovered artefacts uncovered remarkable innovations linked to the emergence of many contemporary natural sciences. They had a substantial impact on the European civilisation for millennia to present day.

Among them are the first astronomical observatories, European cities with hygiene facilities and advanced medicine. They reveal the significant achievements of the ancient Thracians (Thraco-Pelasgians), millennia before the civilisations of Mesopotamia, Egypt and later Greece. Their pioneering innovative contributions to contemporary natural sciences medicine and astronomy are significant for the development of humanity.

The epoch is famous in the scientific literature as the 'Golden Millennia,' (Gimbutas, 1981), because people lived in peace [21]. Without the threat of war conflict, the Danube Civilisation was able to cultivate highly innovative systems of medicine, agronomy, and cosmic observation.

Въведение

Първата цивилизация, възникнала в Европа, позната от редица изследователи като Дунавската цивилизация на траките, е възникнала през VII хил. пр.н.е. Нейният забележителен възход през „Златните хилядолетия“ (Gimbutas, 1981) е известен с мирното развитие на иновативността и креативността. По дефиницията на А. Фол трако-пеласгите (траките) са автохтонното (местно, коренно) население на Балканите, оформило докласическата културна приемственост в Европа. Това население е фундаментален компонент в етногенезиса на българите. [3, 10, 15, 17, 21].

Територията на днешна България се асоциира с водещия иновативен център на първата цивилизация. Той се е отличавал със забележителна културна устойчивост, развитие на първите природни науки в Европа, наличие на астрономически обсерватории, медицина, високо развито изкуство, както и с най-ранната в света сложна металургия на злато и мед.

Институтът за космически изследвания и технологии (ИКИТ) към БАН има съществен принос в съвременното проучване на археологическото наследство от епохата чрез методите на дистанционните изследвания и аерокосмическите технологии.

Забележителните останки от първите градове, светилища – центрове за астрономия и медицина, както и археологически артефакти, открити от водещи международни екипи през последните години допринасят за изграждането на по-пълна картина за иновативните постижения, които ще разгледаме.

Изследователите отбелязват специално отсъствието на организирани войни през „Златните хилядолетия“ (Gimbutas, 1981). Европейското общество процъфтява в условията на забележителен социален мир, доказателства за който се откриват на археологическия терен. През разцвета на Дунавската цивилизация няма военна каста и селищни пластове със следи от пожари, каквито се образуват, когато едно населено място бива разрушено от конфликт. Мирният възход на Дунавската цивилизация допринася за развитието на първите в Европа фундаментални иновативни системи в областта на наблюдението на космически явления, агрономията, медицината и редица природни науки [3, 10, 15, 17, 21].

Възникване на естествознанието и първите природни науки

Проведените археологически проучвания разкриват забележителни иновации, свързани с появата на редица приложни природни науки, оказали значително влияние върху европейската цивилизация в продължение на хилядолетия – чак до наши дни.

Научна хипотеза за произхода и развитието на първата всеобхватна наука – естествознание, и нейни съставни науки през Дунавската цивилизация: Би могло да се издигне хипотезата, че всеобхватната наука естествознание и редица естествени приложни науки, свързани с нея, като астрономия, медицина, фитотерапия (билколечение), растениевъдство, ботаника, животновъдство, ветеринарна медицина, физика, материалознание, архитектура и др., възникват за пръв път в Европа през неолита, по настоящи данни започнал през VII хил. пр.н.е. по време на най-древната цивилизация на трако-пеласгите. Фокусът на изследванията е бил насочен към изучаване на природата в цялост (асоциирана с Великата богиня майка).

Естествознание (дефиниция): област на науката, изучаваща съвкупността на естествените науки, разглеждани като едно цяло. Принадлежи към групата на природните науки и целта му е систематично изследване на природни обекти и организми. То обхваща широка област на изследване сред по-тясно специализираните други науки [10].

Проучванията показват, че през първите хилядолетия на Дунавската цивилизация на траките се натрупват значителни емпирични данни и познания. Те са послужили на европейците да оформят бита си и да планират дейностите си в съзвучие с основни природни закони. Например ранните агрономи са събирали емпирични данни и са ги прилагали, за да съобразят растениевъдството с цикличността на сезоните, климата, спецификите за отглеждане на различни растителни видове, селекцията на подходящи семена от растения, целящи висок добив, облагородяването на нови видове, за да имат добра реколта и да оцеляват през зимните сезони. В резултат на тази дейност хората започват да се хранят разнообразно, подобряват се качеството и продължителността на живота. Натрупват се излишества от храна и населението започва да живее в относително благоденствие спрямо обществата от предишните епохи. Разработват се и се рационализират иновативни технологии в областите на различни естествени науки.

Значителни за науката са разкритите от В. Николов в производствената зона на солодобивния център Провадия иновативни съоръжения с капацитет за пречистване на няколко тона каменна сол (първият консервант, използван от човека). Изобретените в древността големи, дебелостенни керамични съдове (купи и колби), обмазвани с каолинова

глина за по-добра термоустойчивост и изолация са авангардно техническо решение, допринесло съдовете да издържат на високите температури при неколкократното изпаряване на солената вода. Разкритите иновативни съоръжения демонстрират изключително ранно и мащабно индустриално производство, при което каменната сол – най-ценната стратегическа суровина по онова време, служеща за първия универсален консервант и платежно средство – е била добивана чрез изпаряване на разсол [7, 8].

В Провадия се намира и първият град в Европа, укрепен с каменни стени (V хил. пр.н.е.), отличен със „Знак за европейско наследство“ за 2025 г. В екипа на акад. Васил Николов, проучващ иновативния град и солодобивен център имат позитивен принос водещи експерти от ИКИТ към БАН и проф. Бойко Рангелов от СИБ.

В резултат на поредица от емпирични опити по време на Дунавската цивилизация през неолита и енеолита се развиват редица иновативни технологии в сферите на медицината; материалознанието и керамиката; металознанието и металообработването; архитектурните техники, градоустройството, планирането и обществената хигиена. Хилядолетният прогрес на тази цивилизация е със съществен принос за развитието на европейската и световната култура [3, 10, 15, 17, 21].

Емпиричните наблюдения на природни явления, сред които и действието на лекарствените растения, са се предавали и обогатявали от поколенията, населявали земите ни от древността през хилядолетията до наши дни.

Първите астрономически обсерватории в Европа са имали връзка с медицината и аграрните науки

Храмовите комплекси от тази епоха често са били и астрономически обсерватории за наблюдение на небесните тела. Животът на ранните земеделци и скотовъдци е бил изцяло зависим от сезоните, което е налагало прецизно измерване на времето. Чрез изсичания в скалите и специални визири, древните общности са изчислявали астрономическата година с изненадваща точност.

Археоастрономически проучвания са проведении край с. Татул в Родопите в най-добре запазеният у нас храмов комплекс, изсечен в монолитен къс скала с древна обсерватория със специфични улеи и приспособления на саркофазите за наблюдение на астрономическите събития – пролетното и есенното равноденствие, както и лятното и зимното слънцестоене, бележещи повратните точки в годишния цикъл на Земята и смяната на сезоните [8].



Фиг. 1. Мегалитен комплекс Татул (Wikimedia)

А. Радунчева защитава тезата, че древните европейци са използвали светилищата в Родопите като астрономически обсерватории, познавайки небесните тела и разположението на звездите. Тя датира астрономическите им наблюдения към времето на ранната Новокаменна и късната Каменно-медна епоха (периодът на Дунавската цивилизация б.а.). Нейните аргументи се основават на наличието на керамика от тези периоди във всички скални свещени обекти (в това число и на обекта до село Татул) [11].

Наличието на символи и култови фигури от Дунавската цивилизация в района на Белоградчишките скали подкрепя хипотезата, че вероятно древната астрономическа обсерватория, открита там, също принадлежи на тази култура [15, 17].

Религиозният център до Белоградчик и пещерата Магурата са представлявали цялостен сакрален комплекс. Тази хипотеза се потвърждава от изследванията на Т. Стойчев, който е на мнение, че на могилата над пещерата е имало древна обсерватория, от която са запазени каменните линии, маркиращи пролетното и есенното равноденствия и зимното и лятното слънцестоене. Хипотезата на Т. Стойчев е, че слънчевият календар в Магурата е свързан с обсерваторията. В наши дни предстои включването му в списъка с обекти със значение за световната култура на ЮНЕСКО. Би било целесъобразно в бъдеще да се проведат по-задълбочени проучвания [4, 6, 19, 28, 29]



Фиг. 2. Слънчев календар от пещера Магурата (Wikimedia)

Създаденият слънчев календар, открит в астрономическо-религиозния комплекс Магурата, по мнение на изследователите е с продължителност 366 дни. За древността отчитането на слънчевата година с такава точност е изключително постижение. В него са ясно отбелязани основните слънчеви фази през годината — зимното и лятното слънцестоене, както и пролетното и есенното равноденствие. Виждат се периодите, в които се провеждат различните аграрни дейности (фиг. 2) [10, 19].

Дейностите на календара се развиват по посока на часовниковата стрелка. Най-високата точка съответства на лятното слънцестоене. Т-образните символи се асоциират с писмени знаци, обозначаващи трудови дейности и средства за обработка на почвата – мотики, познати в Дунавската цивилизация още от неолита, използвани и през по-късни епохи [10].

На календара ясно се вижда и пиктографско изображение на растение на местоположение, съответстващо на периода на жътвата и на брането на билки след лятното слънцестоене. През хилядолетията тази традиция продължава до наши дни.

Лабораторни проучвания на Научно-практическата база по фитотерапия установяват, че през този период от годината много лекарствени растения имат оптимално съдържание на биологично активни вещества.



Фиг. 3. Диск, изобразяващ вероятно звездна карта от Караново (Европейски виртуален музей, НИМ – София)

Съществува вероятност, че друг открит глинен диск от Дунавската цивилизация (фиг. 3), намерен в Караново, представлява ранна астрономическа карта на звездното небе със съзвездията му. Известно е, че в космогонията от праисторията, древността, античността и средновековието Вселената е била представяна с кръгла или сферична форма, като в центъра ѝ е била Земята. Тези представи отразяват геоцентричната хипотеза на хората. В продължение на хилядолетията астрономията се е развила и днес става ясно, че всяко едно наблюдение зависи от гледната точка [31].

Иновациите в Долнослав: един от основните астрономическо-медицински центрове

Древният комплекс Долнослав близо до Пловдив, се намира в Родопите. На територията му са установени локациите на 27 постройки, като той се очертава сред най-значимите астрономически, научни, медицински и духовни центрове на Дунавската цивилизация, от енеолита, когато културното ѝ развитие е достигнало до своята кулминация. Както скалното светилище Белинташ, така и комплексът край Долнослав попадат в обширна и силно проявена магнитна аномалия. Проведените изследвания показват, че всички аномални точки в храмово-медицинския център се намират вътре в сградите, а на местата им са издигнати олтари. Този факт е показателен за напредналото ниво на познания на първите изследователи в Европа от епохата на Дунавската цивилизация [12, 26].

В нашето съвремие се проучва лечебното въздействие на магнитните вълни. Според Нобеловият лауреат В. Хайзенберг магнитното поле представлява елементарна енергия, от която зависи животът на организма, тъй като допринася за движението на йоните в клетката. То се отразява на ускоряването на метаболизма, стимулирайки енергийните процеси. Магнитното поле на Земята е естествен стимулатор на физиологичните процеси в живия организъм. Както е известно, наблюденията на хора, престояли дълго време в космоса, показват, че липсата на естествено магнитно поле причинява безсъние, умора и депресия, като същевременно увеличава риска от остеопороза. Съвременни медицински изследвания доказват благоприятното му влияние върху човешката психика и здраве [30, 32].

В Долнослав са изучавани небесните тела, като се е обръщало особено внимание на годишния ход на Слънцето и Луната (както и на по-удобните за наблюдения звезди и съзвездия като Плеядите например). Същевременно, храмовият комплекс, разположен на локация със специални геоложки и геофизични дадености, е сред най-големите обществени религиозно-медицински центрове на Дунавската цивилизация [26].

Цялостното планиране на обекта показва, че сградите са били групирани главно по протежение на две пресичащи се улици. Постройките, попадащи в образуваните четири фили (инсули), са били обединени от обща тематична насоченост. Централният и останалите храмове, намиращи се в югоизточната инсула, са били посветени на годишния път на слънцето, раждането, животът и здравето [13, 26].

Различните сгради от култовия комплекс до Долнослав са били обзаведени с различни видове олтари и подови релефи. За замазка на съоръженията е използван магнезит $MgCO_3$ (магнезиев карбонат), залежите от който са открити в района на скалното светилище. Според легендите от района този минерал е свързвал човека с природата и му помагал по-лесно да общува с животните. Интересно е да се отбележи, че с помощта на инфрачервена спектроскопия е идентифициран магнезит в космоса – на планетата Марс и на някои метеорити. Статията „Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars“ (Ehlmann et al., 2008), публикувана в сп. Science, представя първото сигурно откритие на регионални скални слоеве с магнезиев карбонат на повърхността на Марс, установени чрез спектрометъра CRISM на апарата Mars Reconnaissance Orbiter. Асоциацията на тези карбонати с филосиликати в региона Nili Fossae показва, че древното марсианско водно съдържание е било с неутрално до алкално pH [20, 26].

Учудващо големият брой на десетките постройки е едно от доказателствата, че средището е съвместявало няколко функции, сред които астрономическа обсерватория, прорицалище, светилище, медицински център и е имало значим капацитет, позволяващ приема на необичайно голям брой поклонници за престой с преспиване, сред които вероятно и множество болни. Съдейки по намерените артефакти, археолозите установяват, че в храмово-медицинския комплекс са се стичали хора от далечни земи, привлечени от сакралността на локацията и нейното лечебно средище [13].

Наличните артефакти в едно от светилищата бихме могли да свържем с тезата, че сакралната сграда е била сред първите асклепиони в човешката история - здравен център, санаториум и място за духовно и физическо изцеление. Археолозите разкриват в предверието към олтара стена, на която е била пресъздадена мъжка фигура в естествен ръст, която се асоциира с Асклепий, а на пода точно под нея е имало пластично изображение на змия. Около този ансамбъл са намерени следи от ритуално жертвоприношение на агнета, свързани с най-древните праисторически култове към здравеносното божество. В комплекса Долнослав са открити и други предмети с мотиви на змии, за които изследователите предполагат, че са служили като едни от най-ранните познати лунно-слънчеви календари [11, 12, 13].

Интерес представлява тръбната система, използвана за ритуални цели в същия обект. Олтарно огнище, разположено в най-високата част на сградата е свързано с глинени тръби, минаващи под нивото на земната повърхност близо до вертикални стени на олтар, на който е имало масивни култови лампи или вани. Сложно е съчетанието на релефното пано

със съоръжението. Излази от тръбите е имало на различни части по пода около релефа и върху него. Дължината им е била различна и вероятно силата и височината на тоновете също. Артефактите ни позволяват да допуснем, че по тръбите е минавал топъл въздух и пара. Както при редица религиозни церемонии, вероятно са били употребявани растения с ароматни етерични масла. Системата е създавала термални, звукови и визуални въздействия сред присъстващите, може би съчетавани терапевтично с благоуханните и лечебни ефекти на билките. Според изследователите, съоръжението представлява една от най-ранните машини в Европа, конструирана от хора, известна на археологическата наука [11, 12, 13].

Впечатление правят множеството изящно изработени съдове (фиг. 4), открити в храма и в комплекса Долнослав. Там са открити и ритуални фигурки на бременни жени, за които се счита че са били използвани в ритуали за изцеление. Детайлното и анатомично правилно моделиране на бременните тела и женските органи показва, че са съществували задълбочени познания за човешкото тяло и процеса на износване на плода [11, 13].



Фиг. 4. Съдове за билкови извлеци от енеолитния комплекс в Долнослав.
РАМ Пловдив (Р. Памукова-Майкълсън)

Можем да издигнем тезата, че откритите находки в Долнослав (фиг. 4) са използвани за приготвянето на билкови извлеци и са доказателство за напредналите практики на най-ранната фитотерапия и медицина в Европа.

При изследвания на седименти и вътрешността на съдове от епохата на неолита и енеолита често се откриват микроостатъци от лечебни растения (напр. бял равнец – Achillea millefolium L, лайка – Matricaria chamomilla, бъз – Sambucus N.), чието приложение днес е изучено и обосновано от доказателствената медицина [10]. Би било целесъобразно да продължат проучванията в тази област.

Дискусия и изводи

Дунавската цивилизация поставя фундаменталните основи на естествознанието и природните науки в Европа. Тя се откроява с редица иновации в областта на астрономията, медицината, общественото здраве, планирането на населените места и други научни направления.

Забележителни са откритията от български и международни теренни проучвания, особено през последните години, по нашите земи и в съседни държави от периода на Дунавската цивилизация.

Сред тях се открояват най-древните градове и селища в Европа, като Провадия, Юнаците, Слатина, Караново, Дуранкулак и множество други, където се откриват първите хигиенни нововъведения в Европа. Проучванията показват забележително за епохата планиране. Къщите са подредени в улици и има специално обособени санитарни и производствени зони. Откритите структури свидетелстват за сложна архитектура с изолация на подовете посредством многопластово измазване с пречистена глина – метод за предпазване от влага и патогени, който е пряко свързан с битовата хигиена [10].

Тези селища доказват съществуването на високоразвита култура в Тракия през неолита и енеолита (VI и V хилядолетие пр.н.е.), изпреварила с хилядолетия възхода на Месопотамия и Египет и по-късно Елада.

Изградените храмови комплекси с древни астрономически обсерватории и медицински центрове са допринесли за мащабното развитие на древната наука с фундаментални иновации. Сред тях е и най-ранната писменост в Европа, за която свидетелстват анализите на сбирки от около 970 надписани артефакта, сред които са петроглифите със символи до календара в Магурата, плочката с писмени знаци от Градешница, глинени печати (пинтадери) от Стара Загора, Караново и други [10, 23, 24]. Те разкриват значимите постижения на траките още през древността.

Дунавската цивилизация също поставя основата на най-ранното металообработване на злато и мед в историята на човечеството, което представлява един от най-фундаменталните факти в световната праистория. Забележителни са иновативните технологии на фина обработка на златните ювелирни накити от Варненското съкровище, както и тези, открити в Дуранкулак и Провадия [10].

През епохата се заражда първата истинска металургична революция в света. Халколитните медни рудници на Дунавската цивилизация в местността „Мечи кладенец“ (Айбунар) край Стара Загора представляват иновативен рудодобивен център, който е и най-мащабния в Европа от V хилядолетие пр.н.е. Обектът е археологическо доказателство за неподозирани за епохата си технологични иновации и значителен добив на хиляди тонове руда. Инженерното планиране е забележително, напр. древните миньори са прокарвали прецизни открити траншеи и подземни галерии по протежение на рудно тяло с дължина над 1.5 km. Рудокопачите използвали революционна за времето си иновативна технология — огневия способ (нагряване на скалата с огън и последващо заливане с вода, за да се напука и да се извлече медната руда) [10].

Археологическите проучвания продължават да разкриват всяка година, че "Люлката на европейската цивилизация" се намира в Черноморския регион и по поречието на Долен Дунав.

Иновативните приноси в областта на естествознанието и природните науки, свързани с него, включително агрономията, селекционерството, медицината, материалознанието, астрономията и други са доказани от международни проучвания и стотици артефакти. Те установяват, че по българските земи е съществувало първото високоразвито общество в Европа, което изпреварва с хилядолетия цивилизациите на Месопотамия и Древен Египет. То полага основите, допринесли за по-късното развитие на естествознанието, природните науки и медицината в Европа.

Проучванията доказват, че природните и техническите науки, както и медицината на трако-пеласгите и по-късно – на българите, са носители на най-дългогодишния практически опит в Европа. Емпиричните наблюдения са се предавали и обогатявали от поколенията, населявали тези земи от древността през хилядолетията [10].

Нишката на новаторството също е непрекъсната до днес. Българските изобретатели в нашето съвремие отново са с водещи световни приноси в същите направления на природните, аграрните и техническите науки – астрономия, медицина, селекционерство, металолеене и други области.

Литература:

1. Апостолов, М. История на медицината. София, Медицина и физкултура, 1977.
2. Воденичаров, Ц., С. Попова, М. Мутафова, Е. Шипковенска. Социална медицина. София, ГорексПрес, 2013, с. 174.
3. Детев, П., Й. Детев. Тракийската Атлантида. Прародината на траките. Книга Първа, София, ИК Българско общество за мултимедийно изкуство, 2002.
4. Мардиросян, Г., Основи на дистанционните аерокосмически технологии. София, Нов български университет, 2015.
5. Мардиросян, Г., Природни бедствия и екологични катастрофи. Изучаване, превенция, защита. София, Академично издателство „Проф. Марин Дринов“, 2024.
6. Марков, В. Културно наследство и приемственост. Наследство от древно езическите свети места в българската народна култура. УИ „Неофит Рилски“, Благоевград, 2007.
7. Николов, В. Чудесата на България. Солта – златото на Провадия. София, Стандарт, 2011.
8. Николов, Н., С. Златев, К. Василева. Астрономически смисъл на тракийския паметник Татул. сп. Археология, кн. 2, 1988 г.
9. Овчаров, Н. Д. Коджаманова. Перперикон – свещеният скален град на траките. Варна, ИК Славена, 2006, с. 15–16.
10. Памукова-Майкълсън, Р. Иновативен принос на Дунавската цивилизация към европейската наука, медицина и обществено здраве. София, Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“, 2021.
11. Радунчева, А. Храмовият център до с. Долнослав, Пловдивско и някои аспекти на ритуалността в края на каменно-медната епоха. Годишник на Департамент Археология - НБУ, 2–3, 1996, с. 168–181.

12. Радунчева, А. Енеолитния храмов комплекс до с. Долнослав, Пловдивско и системата от скални светилища с праисторически културни пластове в Родопите и извън тях. Известия на Археологически музей Пловдив, 9/1, 2002, с. 96–119.
13. Радунчева, А. Неолитни и халколитни сгради с необичаен план на застрояване и тяхното обзавеждане. Праисторическа Тракия – доклади от международния симпозиум в Стара Загора, 30.09–04.10.2003. Археологически институт с музей – БАН, Регионален исторически музей – Стара Загора, 2004, с. 321–334.
14. Сачев, Е. Българите са в основата на човешката цивилизация. София, Новата цивилизация, 2017.
15. Тодорова, Х., И. Вайсов. Новокаменната епоха в България, София, Наука и изкуство, 1993.
16. Фол, Ал., История на българските земи в древността, част I. София, УИ "Св. Климент Охридски", 1997.
17. Харман, Х. Загадката на Дунавската цивилизация. Откриването на най-старата високоразвита култура в Европа. София, Захарий Стоянов, 2019.
18. Чернаков, Д. Русенска селищна могила Регионален исторически музей Русе. https://www.museumruse.com/rusehistory/rsm_bg.html (Достъп 23.06.2020).
19. Arca A., Bulgarian rock art: the Magura Cave paintings. TRACCE Online Rock Art Bulletin, 33, Nov., 2014. https://www.academia.edu/9446069/Arc%C3%A0_Andrea_2014_Bulgarian_rock_art_the_Magura_Cave_paintings (Retrieved: 06.04.2026).
20. Ehlmann, B., J. Mustard, S. Murchieet al. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars. Science, Vol. 322, No.5909, 2008, pp. 1828–832.
21. Gimbutas, M. The Civilization of the Goddess: The World of Old Europe. San Francisco. Harper, 1991.
22. Johnson MT, Waite LR, Nindl G. Noninvasive treatment of inflammation using electromagnetic fields: current and emerging therapeutic potential. Biomedical sciences instrumentation, 2004, Vol. 40, pp. 469–474.
23. Lazarovici, Gh., Database for Spiritual Symbols of Spiritual Life in J. Maller, M.R. Dexter. Signs of Civilisation, Sebastopol-Novi Sad, Serbia, 2009.
24. Merlini, M. An inquiry into the Danube Scripts Sibiu. Alba Iulia, 2009.
25. Pamukova, R., E. Radev, M. Vizeva. Why Thracians Were the Most Long-Lived People in Antiquity? Trakia Journal of Sciences, 2018, Vol. 16, Suppl. 1, pp. 97–104.
26. Raduncheva, A. Aeneolithic astronomical observations and mythological beliefs. Astronomical Traditions in Past Cultures (Proceedings of the First Annual General Meeting of the European Society for Astronomy in Culture (SEAC) Smolyan, Bulgaria, 31 August – 2 September, 1993, pp. 162–-166.
27. Stoychev T., New-found prehistoric images and signs in Magoura cave and Tzarevetz cave complex. Archaeological Discoveries and Excavations during 1994, Smolian, 1995, pp. 13–15.
28. Stoychev T., Gerassimova V., Bronze-Age regional calendars in monochrome cave paintings in Bulgaria. Annuary of Department of Archaeology – NBU, 1994, Vol. 1, pp. 8–22.
29. Stoychev, T. Regional sun-based calendar: New interpretation of a late Eneolithic find. Archeology in Bulgaria 1, pp. 30–38.
30. Wang HY, Zhai LJ, Qian M. The internal energies of Heisenberg magnetic systems. J Magn Magn Mater. 2014, Vol. 354, pp. 309–316.
31. Wikimedia photos: official website. https://www.wikimedia.org/ (Retrieved: 06.04.20-05.02.21).
32. Zwolińska, J., M. Gąsior, E. Śnieżek, A. Kwolek, The use of magnetic fields in treatment of patients with rheumatoid arthritis. Review of the literature. Reumatologia, 2016, 54(4), pp. 201–206.

EUROPEAN AND NATIONAL LEGAL ASPECTS OF OWNERSHIP OF GEOSPATIAL DATA OBTAINED THROUGH SATELLITE AND UAV TECHNOLOGIES

Kaymet Baadieva, Milen Chanev, Georgi Jelev

Authors' affiliation: Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: kaymetbaadi@mail.space.bas.bg

Keywords: *Geospatial data, Satellite data, UAV data, Intellectual property, European law, National legislation*

Abstract: *The development of satellite systems and unmanned aerial vehicles (UAV) expands the possibilities for acquiring, processing and using geospatial data. Their increasing application in science, public administration and economic activities raises questions concerning rights over raw and derived data, conditions of access and the permissibility of their reuse. The aim of this study is to identify and analyse the applicable European and national legal regimes. The methods used include normative, systematic and comparative legal analysis, a review of the case law of the Court of Justice of the European Union and practical case studies. The study finds that geospatial data are not subject to a single, absolute right of ownership. Their legal regime is determined by the combination of copyright, contractual, licensing and public-law provisions. An approach has been proposed for the ex ante determination of rights and obligations governing the use of data obtained through remote sensing technologies.*

ЕВРОПЕЙСКИ И НАЦИОНАЛНИ ПРАВНИ АСПЕКТИ НА СОБСТВЕНОСТТА ВЪРХУ ГЕОПРОСТРАНСТВЕНИ ДАННИ, ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ САТЕЛИТНИ И БЛА ТЕХНОЛОГИИ

Каймет Баадиева, Милен Чанев, Георги Желев

Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките
e-mail: kaymetbaadi@mail.space.bas.bg

Ключови думи: *Геопространствени данни, Сателитни данни, БЛА данни, Интелектуална собственост, Европейско законодателство, Национално законодателство*

Резюме: *Развитието на сателитните системи и безпилотните летателни апарати (БЛА) разширява възможностите за придобиване, обработване и използване на геопространствени данни. Нарастващото им приложение в науката, публичната администрация и стопанската дейност поставя въпроси относно правата върху първичните и производните данни, условията за достъп и допустимостта на повторното им използване. Целта на изследването е да се установят и анализират приложимите европейски и национални правни режими. Използвани са нормативен, систематичен и сравнителноправен анализ, преглед на съдебната практика на Съда на Европейския съюз и практически казуси. Установява се, че геопространствените данни не са обект на единно абсолютно право на собственост. Правният им режим се определя от съчетаването на авторскоправни, договорни, лицензионни и публичноправни разпоредби. Предложен е подход за предварително определяне на правата и задълженията при използване на данни, получени чрез дистанционни технологии.*

1. Introduction

Modern remote sensing technologies for Earth observation offer significant opportunities to obtain accurate spatial information for diverse applications. Satellite imagery, digital terrain models, orthomosaics, multispectral measurements and thematic maps are used in environmental monitoring, agricultural land management, spatial planning, scientific research and public administration Technological progress, however, has outpaced the ability to explain the relationships among data creators, holders, processors and users through the traditional concept of ownership [1–7].

However, technological progress has outpaced the ability of traditional ownership concepts to adequately explain the legal relationships among data creators, data holders, data processors, and data users. Different forms of access to such data can be identified by examining how they are made available to various organisations for different purposes.

Furthermore, there is a need to examine and analyse these relationships in the context of statutory and contractual licensing arrangements, as well as intellectual property rights.

Technological progress creates opportunities for downstream growth and value creation. These developments enable geospatial data to be incorporated into new information services and products [8]. This, in turn, necessitates the establishment of an appropriate legal and regulatory framework governing the relationships among the creators, holders, and users of such data.

Technological development, however, has outpaced the ability to explain the relationships between data creators, holders, processors and users through the traditional concept of ownership.

The principal legal issue arises when determining rights over information obtained through satellite or UAV imaging. Ownership of the technical system, financing of the imaging operation or ownership of the observed immovable property does not automatically entail the acquisition of exclusive rights over the resulting geospatial data [9–11].

Further complexity arises from the fact that a single geospatial product may contain raw measurements, processed images, structured databases, software algorithms and cartographic visualisations. Different legal regimes may apply to the individual components [2, 9, 11].

Of particular importance are copyright, the *sui generis* right (from Latin, “of a special, independent kind”; the right of a database maker arising where the substantial investment required by law has been made in obtaining, verifying or presenting the contents of the database), contractual and licensing rights, personal data protection and the rules governing the reuse of public sector information [9, 11, 12, 13, 14].

The relevance of this study stems from the need for scientific organisations, public institutions and commercial operators to apply several legal instruments simultaneously when creating and using geospatial products [9–21].

2. Aim, materials and research methods

The study aims to identify, systematise and analyse the European and national legal aspects governing the acquisition, access, processing, use and dissemination of geospatial data obtained through satellite and UAV technologies. The overall methodological framework of the study is presented in Fig. 1.

To achieve this aim, European Union legislation, relevant Bulgarian legislation and the case law of the Court of Justice of the European Union have been examined.

A legal-dogmatic method has been applied to clarify the content of legal provisions, systematic interpretation to establish the relationships between individual regulatory regimes, and comparative legal analysis of the European and national legal frameworks.

The practical application of the provisions examined is considered through four illustrative case studies involving public institutions, scientific organisations, agricultural producers and commercial satellite service providers. The cases are analytical in nature and do not represent the results of an independently conducted empirical experiment.

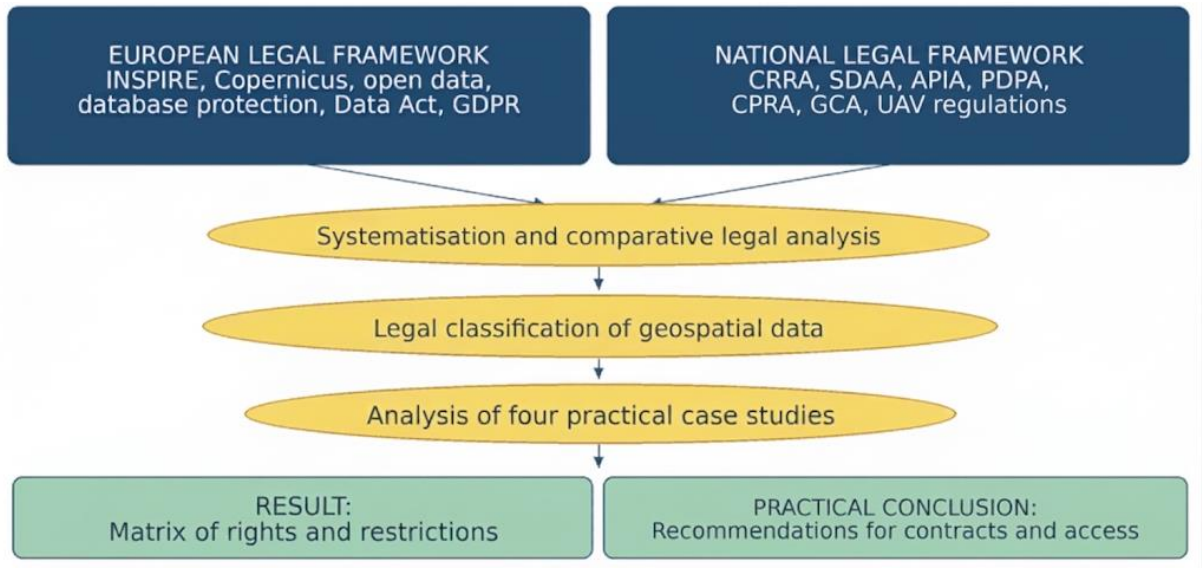


Fig. 1. Methodological framework of the study

3. Results and discussion

3.1. Legal characteristics of geospatial data

The legal analysis demonstrates the need to distinguish between the individual technological components of geospatial products.

Raw data include automatically acquired images, coordinates, radiometric values and telemetry information. They constitute factual measurements which, in themselves, do not always meet the conditions for copyright protection. Processed data include orthorectified images, orthomosaics, point clouds and digital surface or terrain models. Their legal classification depends on the nature of the processing performed, the presence of an original creative contribution and the applicable contractual terms [2].

Derived products, including thematic maps, classifications and results obtained by calculating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), should likewise not be treated as a single legal category. Individual numerical values constitute data, whereas an original cartographic visualisation may qualify as a protected work [15].

Consequently, the legal regime must be determined separately for each technological component.

3.2. European legal framework

Directive 2007/2/EC, known as INSPIRE, establishes an infrastructure for spatial information in the European Union. Its main objectives relate to interoperability, metadata, access to and exchange of spatial information. It does not establish a general right of ownership over geospatial data [1].

Directive (EU) 2019/1024 on open data and the reuse of public sector information introduces rules promoting access to public information resources. Of particular importance is Commission Implementing Regulation (EU) 2023/138, which identifies specific high-value datasets. These include geospatial data and information related to Earth observation and the environment. Conditions for reuse are provided for the datasets covered, including open licences such as CC0 and CC BY 4.0 [2, 3].

Regulation (EU) 2021/696 establishing the Union Space Programme governs the policy of the Copernicus programme. Under Article 53, data and information from the programme are, as a rule, made available on a free, full and open-access basis, subject to certain restrictions, including those relating to security and third-party rights [18].

However, open access to data from Sentinel satellites does not mean that their users acquire an exclusive right of ownership over those data [11, 12, 18].

Regulation (EU) 2022/868 on European data governance establishes an additional framework for sharing and reusing certain categories of protected data without introducing universal ownership over them [10].

3.3. Intellectual property and database protection

Directive 96/9/EC on the legal protection of databases provides for two separate mechanisms: copyright protection where the selection or arrangement of the contents is original, and a sui generis right of the maker where there has been a substantial investment in obtaining, verifying or presenting the data [19].

This distinction is important because investment in the creation of data itself is not necessarily an investment giving rise to the sui generis database right [20].

Regulation (EU) 2023/2854, known as the Data Act, introduces rights and obligations concerning access to certain data from connected products and related services. Article 43 restricts the application of the sui generis database right in relation to data obtained from or generated by products and services falling within the scope of the Regulation [12].

When UAVs are used, the applicability of this regime must be determined according to the nature of the specific data. Telemetry information and captured images should not automatically be given the same legal classification.

3.4. National legal framework

Several interrelated legal instruments are relevant under Bulgarian law.

The Copyright and Related Rights Act (CRRA) establishes the conditions for the protection of works, including maps, diagrams and other outputs of an original creative nature. Facts and data do not, in themselves, automatically enjoy copyright protection [16].

The Spatial Data Access Act (SDAA) regulates the national infrastructure for spatial information, access to the relevant datasets and services, and certain grounds for restricting such access [21].

The Access to Public Information Act (APIA) contains provisions on the reuse of public sector information. Their applicability must be taken into account, particularly in publicly funded scientific projects and information resources [22].

The Cadastre and Property Register Act (CPRA) and the Geodesy and Cartography Act (GCA) regulate specialised matters relating to cadastral, geodetic and cartographic information [10].

The distinction between information about the ownership of immovable property and rights over the geospatial data themselves is essential [14, 23].

3.5. UAV technologies and personal data protection

Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 and Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 establish basic rules concerning the operation of unmanned aircraft systems. The relevant national regulatory framework also applies in Bulgaria [24].

Compliance with aviation requirements, however, does not automatically determine rights over the images and other data obtained during a flight [16, 24].

Where images contain information relating to identified or identifiable natural persons, Regulation (EU) 2016/679 – the General Data Protection Regulation (GDPR) – applies, together with the relevant national provisions. Consequently, possession of a file or the right to use it does not exempt the operator from personal data protection obligations [25].

4. Practical case studies and case law

Case study 1. A municipality commissions UAV imaging

A municipality commissions imaging of an urbanised area using an unmanned aircraft system. The operator obtains raw images, while a subcontractor creates an orthomosaic, a digital surface model and a three-dimensional point cloud.

Commissioning and paying for the service does not automatically mean that the municipality acquires all possible rights over the resulting outputs [10-12].

Legal conclusion: the contract should expressly regulate the delivery of raw data, rights over processed products, permitted disclosure to other administrations, and the applicable requirements for public access and reuse.

Case study 2. SRTI–BAS combines Sentinel-2 and UAV data

In a scientific project, the Space Research and Technology Institute at the Bulgarian Academy of Sciences uses Sentinel-2 imagery and multispectral information obtained by UAV.

The input satellite data are used in accordance with the Copernicus policy, whereas the UAV data may be subject to separate contractual terms.

Processing may result in the creation of algorithms, structured databases and thematic maps. The individual outputs may have different legal statuses.

Legal conclusion: rights over the input data, developed software, database and final scientific product must be distinguished, including by reviewing publication and open-science requirements.

Case study 3. An agricultural producer commissions multispectral imaging

An agricultural producer commissions a specialised company to image cultivated areas using a UAV.

Based on the resulting imagery, the provider prepares maps and analyses of vegetation condition.

The client has an interest in obtaining access to both raw and processed data, while the contractor may hold separate rights over previously developed algorithms and software solutions.

Legal conclusion: the contract should distinguish the deliverables, rights of subsequent use and the conditions for using client data in the development of other products.

Case study 4. A commercial satellite imagery provider

A commercial provider supplies a high-resolution satellite image to a client under a licence.

The licence may restrict the number of users, the distribution of the image and its inclusion in other products.

When creating derivative cartographic materials, the terms of the original licence must be taken into account.

Legal conclusion: acquiring access to a satellite image does not necessarily mean acquiring exclusive rights over it [11, 12. 18].

4.1. Case law of the Court of Justice of the European Union

The judgment in Case C-203/02, British Horseracing Board, distinguishes investment in the creation of data from investment in obtaining pre-existing contents for a database [14].

In Case C-604/10, Football Dataco, the Court emphasised the importance of originality for copyright protection of databases [26].

The judgment in Case C-30/14, Ryanair, considers the significance of contractual restrictions in relation to a database that does not qualify for the relevant protection under Directive 96/9/EC [27].

Case C-762/19, CV-Online Latvia, examines the conditions for protection against extraction and reuse of database contents and the importance of the investment being protected [17].

This case law confirms that the technical complexity and economic value of data are not, in themselves, sufficient to establish exclusive rights.

5. Recommendations for practical application

The findings of the study substantiate the need for scientific organisations and public institutions to determine in advance the legal regime applicable to the geospatial data they use.

An appropriate tool is a rights matrix that includes the data source, type of technological product, applicable licence, potential intellectual property rights, access restrictions and conditions for subsequent use.

Contracts for satellite and UAV services should expressly distinguish rights over raw imagery, processed data, metadata, algorithms and derived products.

Traceability of acquisition and processing should also be ensured by retaining information about the sensor used, the time and location of imaging, the software and any modifications made.

6. Conclusion

The study finds that the legal regime of geospatial data obtained through satellite and UAV technologies is characterised by multiple interrelated legal grounds.

European and national legislation do not establish a universal, absolute right of ownership over all categories of geospatial data.

Depending on their nature, copyright, sui generis database rights, contractual rights or statutory restrictions on access and processing may arise.

Therefore, in scientific, administrative and commercial applications, the prior legal classification of each information component is of decisive importance.

The main conclusion is that legal certainty in the use of geospatial data is achieved through clearly defining rights, obligations and restrictions, rather than broadly referring to them as “ownership”.

References:

Note: the links lead to official primary legal sources. The analytical conclusions in the text are the authors’ own and are derived through systematic interpretation of the listed legal acts and case law.

1. European Parliament and Council, Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE) [2007] OJ L 108/1.
2. United Nations General Assembly, Principles Relating to Remote Sensing of the Earth from Outer Space, GA Res 41/65, UN Doc A/RES/41/65 (3 December 1986).
3. European Parliament and Council, Directive (EU) 2019/1024 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on open data and the re-use of public sector information (recast) [2019] OJ L 172/56.
4. Stankova, N., & Avetisyan, D. (2026). A Multispectral Satellite-Based Integrated System for Monitoring Fire Disturbance and Recovery Dynamics in Forest Ecosystems. Geomatics, 6(3), 55. https://doi.org/10.3390/geomatics6030055
5. Dimitrov, P., Roumenina, E., Ganeva, D., Gikov, A., Kamenova, I., & Bozhanova, V. (2024). Enhancing pléiades-based crop mapping with multi-temporal and texture information. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 36, 101339. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101339
6. Ivanov, I., & Filchev, L. (2025). Transition Metal Elemental Mapping of Fe, Ti, and Cr in Lunar Dryden Crater Using Moon Mineralogy Mapper Data. Engineering Proceedings, 94(1), 5. https://doi.org/10.3390/engproc2025094005
7. Atanasova, D., Bozhanova, V., Biserkov, V., & Maneva, V. (2021). Distinguishing areas of organic, biodynamic and conventional farming by means of multispectral images. A pilot study. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 35(1), 977–993. https://doi.org/10.1080/13102818.2021.1938675
8. Dimitrov, Z. (2025). Multi-Frequency SAR Utilization in Mountainous Regions in Bulgaria for Forest Boundaries Determination with Impact of Seasonality. Aerospace Research in Bulgaria, 37, 73–81.

9. Smith, L.J., Petrovici, G. (2018). Legal Aspects of Satellite Based Earth Observation—An Introduction. In: Brünner, C., Königsberger, G., Mayer, H., Rinner, A. (eds) Satellite-Based Earth Observation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74805-4_18
10. European Parliament and Council, Regulation (EU) 2022/868 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2022 on European data governance and amending Regulation (EU) 2018/1724 (Data Governance Act) [2022] OJ L 152/1.
11. European Parliament and Council, Directive 96/9/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 1996 on the legal protection of databases [1996] OJ L 77/20.
12. Regulation (EU) 2023/2854 of the European Parliament and of the Council of 13 December 2023 on harmonised rules on fair access to and use of data and amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directive (EU) 2020/1828 (Data Act), OJ L, 2023/2854, 22 December 2023, Article 43.
13. European Commission, Commission Implementing Regulation (EU) 2023/138 of 21 December 2022 laying down a list of specific high-value datasets and the arrangements for their publication and re-use [2023] OJ L 19/43.
14. Access to Public Information Act (Bulgaria), State Gazette No. 55, 7 July 2000, as amended.
15. European Parliament and Council, Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) [2016] OJ L 119/1.
16. Copyright and Related Rights Act. Promulgated in State Gazette No. 56 of 29 June 1993, as amended and supplemented, most recently by State Gazette No. 70 of 20 August 2024.
17. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/138 of 21 December 2022 laying down a list of specific high-value datasets and the arrangements for their publication and re-use (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union, L 19, 20 January 2023, pp. 43–75.
18. European Parliament and Council of the European Union (2021). Regulation (EU) 2021/696 of 28 April 2021 establishing the Union Space Programme and the European Union Agency for the Space Programme and repealing Regulations (EU) No 912/2010, (EU) No 1285/2013 and Decision No 541/2014/EU. Official Journal of the European Union, L 170, 12 May 2021, pp. 69–148.
19. European Parliament and Council of the European Union (1996). Directive 96/9/EC of 11 March 1996 on the legal protection of databases. Official Journal of the European Communities, L 77, 27 March 1996, pp. 20–28.
20. The British Horseracing Board Ltd and Others v William Hill Organization Ltd, Case C-203/02, Judgment of the Court (Grand Chamber) of 9 November 2004, ECLI:EU:C:2004:695.
21. Republic of Bulgaria, Spatial Data Access Act, State Gazette No. 19 of 9 March 2010, as amended.
22. Republic of Bulgaria, Access to Public Information Act, State Gazette No. 55, 7 July 2000, as amended.
23. Republic of Bulgaria, Cadastre and Property Register Act, State Gazette No. 34, 25 April 2000, as amended.
24. Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft [2019] OJ L 152/45.
25. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) [2016] OJ L 119/1.
26. Court of Justice of the European Union, Football Dataco Ltd and Others v Yahoo! UK Ltd and Others, Case C-604/10, Judgment of 1 March 2012, ECLI:EU:C:2012:115.
27. Court of Justice of the European Union, Ryanair Ltd v PR Aviation BV, Case C-30/14, Judgment of 15 January 2015, ECLI:EU:C:2015:10.