BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
Space Research and Technology Institute
RAKOVSKI NATIONAL DEFENCE COLLEGE
BULGARIAN ASTRONAUTICAL SOCIETY

TWENTY-FIRST
INTERNATIONAL
SCIENTIFIC CONFERENCE

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

S E S 2025

PROCEEDINGS

The Conference is supported by Bulgarian National Science Fund
Contract № КП-06-МНФ/16 — 20.06.2025

2025

Organizational Committee

Honoured Chairman: Corr. Member Evelina Slavcheva

Chairman:	***Members:***
Corr. Member Petar Getsov, DSc	Major-general Stayko Prokopiev
	Prof. Tsvetan Dachev, DSc
	Prof. Dr. Hristo Nikolov
Vice-Chairman:	Assoc. Prof. Dr. Simeon Asenovski
Prof. Garo Mardirossian, DSc	Dr. Krassimir Stoyanov
	Valeri Vassev, MS
	Mariyana Toncheva, MS
Secretary:	Adelina Kuzeva, MS
Prof. Dr. Lachezar Filchev	Mariana Zaharinova

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	Assoc. Prof. Dr. Alexey Stoev
	Assoc. Prof. Dr. Nadya Marinova

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-first International Scientific Conference „Space, Ecology, Safety – SES 2025", which was held in October 2025, Sofia.

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

Tsvetan Dachev, Borislav Tomov, Yuriy Matviichuk, Mityo Mitev, Malina Yordanova, Jordanka Semkova, Victor Benghin, Viacheslav Shurshakov, Donat-Peter Haeder, Gerda Horneck, Guenther Reitz, Frantisek Spurni, Ondrej Ploc, William Tobiska, Benjamin Hogan, Brad Gersey
Space Radiation Investigations with Lyulin-Type Instruments in the Period 1989–2022 …… 9

Session 1
Space Physics

Peter I. Velinov, Simeon Asenovski, Lachezar Mateev
Corimia Ionization Model – Three Interval Approximation for Cosmic Ray Protons (Z = 1) ……... 19

Atanas Atanassov
Accurate Determination of the Boundaries of the Intervals in Which Situational Conditions are Fulfilled. Algorithm and Subroutines …… 25

Krasimir Krastev, Jordanka Semkova, Rositza Koleva, Viktor Benghin, Sergey Drobyshev
Abrupt Variations of the Radiation Field Around Mars, Measured by the Liulin-MO Instrument ….. 33

Rositsa Miteva, Nikola Antonov, Adrian Sonka
The Use of Astronomical Data for Satellite Tracking …… 39

Rositsa Miteva, Pencho Markishki, Werner Pötzi, Momchil Dechev, Dragomir Marchev, Samuil Petrov, Georgi Latev, Hristo Kirov, Kamen Kozarev
A Network for Solar Optical Observations in Bulgaria …….. 45

Красимира Янкова
Времето – основно състояние преди генезиса …… 49

Denislav Rusev, Daniela Boneva, Krasimira Yankova
Some Observational Effects During Selected Time-Intervals of the Z Cam Star SY Cnc …….. 52

Alexey Stoev, Ognyan Ognyanov, Penka Stoeva
Detection and Registration of Orbital “Space Junk” with Optical Instruments on Small Space Platforms …… 60

Penka Stoeva, Desislava Teneva, Alexey Stoev
Evolution of Changes in the Structure of the Solar Corona with the Phase of Solar ……... 67

Session 2
Aerospace Technologies and Biotechnologies

Konstantin Metodiev
Trajectory Control for a Quadcopter …… 75

Konstantin Metodiev
Pilot’s Performance Assessment Through Data Mining ……... 81

Николай Загорски
Математическо описание на модела на типов полет на хеликоптер AS532AL Cougar с външно пожарогасително устройство от типа “Bambi Bucket 4453” за гасене на пожари 87

Николай Загорски
Изследване на динамичната устойчивост на външно пожарогасително устройство от типа “Bambi Bucket BB4453”, закачено под хеликоптер AS532AL Cougar в полет за гасене на пожари ……..…….…..… 93

Павлин Граматиков, Стефан Шопов
Дистанционни измервания на атмосферни замърсители с безпилотни летателни апарати ... 99

Павлин Граматиков, Джулиан Тахов
Позициониране в реално време (RTK) за безпилотни летателни апарати ……..….. 106

София Узунова, Михаил Желязов
Повишаване точността при измерване разстоянието до въздухоплавателно средство при кацане, с приложение на многопозиционна локация …….. 112

София Узунова, Михаил Желязов
Резултати след симулативно изследване на метода за валидиране на ADS-B сигнали с използване на многопозиционна локация ……..…. 118

Филип Илиев
Модел на отказочувствителна калманова филтрация за идентификация на откази в радиоканалите на БЛА ……. 125

Филип Илиев, Георги Сотиров
Синтез на канално-съгласувани сигнали за радиоуправление на БЛА ……. 131

Павел Пенев
Следспътников авиационен мониторинг с използване на безпилотни летателни апарати …. 137

Георги Желев, Недко Димитров, Георги Сотиров, Павел Пенев, Зоя Хубенова, Константин Методиев, Росен Димитров, Андон Андонов, Елена Разказова, Апостол Апостолов
Оценка на критичната инфраструктура от индустриалната зона на град Девня и на зоната на Аспаруховия мост на град Варна чрез летателен експеримент с безпилотен летателен апарат …… 143

Evgeni Hubenov, Zoya Chiflidzhanova, Georgi Sotirov
Information Flows and Intelligent Processing in Clusters for Critical Infrastructure Management … 151

Dimo Zafirov, Georgi Georgiev
Foresight Analysis for sUCAS for Military Operations …….. 157

Нели Сивева, Христофор Скандалиев, Калин Крумов, Весислава Тотева
Ресурсни и технологични решения за получаване на енергонаситени материали от биомаса и други алтернативни суровини с местен произход ……..... 163

Петко Якимов
Изследване на ролята на индустриалния и интериорния дизайн в създаването на функционални и обитаеми пространствени среди в космоса ……..…... 172

Петко Якимов
CGI технологиите в киното като средство за визуализиране и публично представяне на космически събития, процеси и данни ……..... 177

Ангел Манев, Динко Господинов, Таньо Танев
Хронология и астрономия в евангелието на поп Минчо от село Дъбене …….. 181

Session 3

Remote Sensing and Geoinformation Systems

Андрей Стоянов
Приложение на спътникови данни от Senitinel-2 за мониторинг на снежната покривка на територията на Пирин планина за период от 10 години 187

Ilina Kamenova, Petar Dimitrov, Rositsa Cholakova, Lachezar Filchev, Ivanka Tringovska, Daniela Ganeva, Stanislava Grozeva
Remote Sensing Monitoring of Watermelon Under Different Water Regimes: Methodology and Preliminary Results 193

Petru Ciocani, Milen Chanev, Pavel Popov, Iskren Ivanov, Lachezar Filchev
Spatial Technologies in Archaeology: from GIS Mapping to SfM-Based Modelling 200

Михаела Цветкова, Милен Чанев, Александър Гиков, Лъчезар Филчев
Методика за сателитен мониторинг на иглолистни гори 207

Bogdan Dimitrov
Mathematical and Physical Modelling of Communications Between GPS/GNSS Satellites with Account of the General Relativity Effects 213

Михаил Първанов
Модел за машинно обучение за краткосрочна прогноза на времето 219

Михаил Първанов
Анализ на метеорологични свободно достъпни данни за прогнозиране на времето с изкуствен интелект 225

Мария Димитрова, Гаро Мардиросян, Стефан Шопов
Възможности за използване на дронове при изследване на атмосферни замърсявания 231

Dimitar Makariev, Plamen Trenchev
Advanced Computational Approaches for Data-Driven and Intelligent Modeling of Atmospheric Processes 236

Любосвет Стоев, Живо Петров
Геопространствено осигуряване с отворен код и неговите приложения 245

Анатоли Радев, Ангел Манев
Оперативна поддръжка на фотоволтаичните електроцентрали и слънчевата активност 249

Session 4

Ecology and Risk Management

Димитър Димитров
Изследване на земетресението в Егион от 15.6.1995 г. и Коринтската сеизмогенна зона 257

Бойко Рангелов
Звездотресенията – видове и сила 262

Rosen Iliev, Boyko Ranguelov, Lachezar Filchev
Terrain Surface Complexity Derived by Remote Sensing: A Case Study of Bulgaria 269

Мария Димитрова, Пламен Тренчев
Сезонно изменение на праховото замърсяване в София по данни от любителски АИС 275

Мария Димитрова, Пламен Тренчев, Лъчезар Филчев, Георги Желев, Милен Чанев
Връзка на сезонно изменение на някои атмосферни замърсители със сезонната заболеваемост от респираторни болести 281

Stanimir Karapetkov, Philip Philipoff, Emad Abdulahad, Kamen Ishtev, Diana Bankova, Plamen Manev, Elka Radeva, Venelin Kondov, Petia Minkova, Daniela Arnaudova, Simeon Panev, Ivan Demerdzhiev, Blagovest Panev, Ilian Dinev, Galina Maslarska, Mehmet Salih Bayraktutan, Venkatanathan Natarajan, Mario Muñoz Organero, Dimo Dimov
Sensors for the National Neural Network for Protection of Buildings and Facilities from Seismic and Wind Loadings …… 287

Stanimir Karapetkov, Philip Philipoff, Emad Abdulahad, Kamen Ishtev, Diana Bankova, Plamen Manev, Elka Radeva, Venelin Kondov, Petia Minkova, Daniela Arnaudova, Simeon Panev, Ivan Demerdzhiev, Blagovest Panev, Ilian Dinev, Galina Maslarska, Mehmet Salih Bayraktutan, Venkatanathan Natarajan, Mario Muñoz Organero, Dimo Dimov
Frequency L2 Analysis of the National Neural Network for Protection of Buildings and Facilities from Seismic and Wind Loadings ……..…….. 292

Dimitar Dimitrov, Evgeni Andreev
Integration of Combined Joint All Domain Command and Control for the Purposes of the Projects under the Simulation Exploration Experience Program ……..…….. 297

Dimitar Dimitrov, Evgeni Andreev
Overview of the Threat of Cyber Incidents in the Space Domain …….. 303

Dimitar Dimitrov, Evgeni Andreev
Utilizing Open-Source Intelligence and Satellite Imagery for Analysis of China's Military Modernization ……..… 308

Гаро Мардиросян, Ваня Иванова
Отражението на природните бедствия в художественото творчество …….. 314

Georgi Georgiev, Mehmet Akşit, Dimo Zafirov, Petar Lulchev, Axel Sikora, Lechosław Tomaszewski
The SUDEM Approach: Advanced Air Mobility Emergency Operations Based on Future Advanced Communication Systems – as Crucial Elements of a System of Systems for Effective Disaster Management ……..…….. 322

Роксандра Памукова-Майкълсън
Зелена аптека: природосъобразни медицински иновации 50-годишнина от създаването на първата научно-практическа база към МНЗ ……..…..…… 329

Надя Маринова-Миланова
Съвременни корпоративни стратегии …… 336

Георги Желев, Лачезар Филчев, Мария Димитрова, Пламен Тренчев, Милен Чанев
ГИС база-данни по проект „Smart Integrated Devices for Telemedicine to Combat COVID-19 Toward New Resilience City“ ……..…….. 341

Session 5
Space Material Science and Nanotechnology

Петя Табакова, Анна Петрова, Корнели Григоров
Трибо-механични свойства на защитни Ti-покрития …….. 349

Петя Табакова, Анна Петрова, Корнели Григоров
Изследване на Cu-сплав с рентгенова фотоелектронна спектроскопия …….. 354

Margarita Dimitrova, Adelina Miteva
Influence of Radiation on the Corrosion Resistance of Titanium Alloys in Space Environment …… 361

Margarita Dimitrova, Adelina Miteva
Synergistic Degradation of Aluminum and Titanium Alloys under Extreme Vacuum and Rapid Temperature Cycling: A Review of Mechanisms and Nanotechnology-Based Mitigation Strategies.…….. 367

Plenary Session

SPACE RADIATION INVESTIGATIONS WITH LYULIN-TYPE INSTRUMENTS IN THE PERIOD 1989–2022

Tsvetan Dachev[1], Borislav Tomov[1], Yuriy Matviichuk[1], Mityo Mitev[1], Malina Yordanova[1], Jordanka Semkova[1], Victor Benghin[2], Viacheslav Shurshakov[2], Donat-Peter Haeder[3], Gerda Horneck[4], Guenther Reitz[4], Frantisek Spurni[5], Ondrej Ploc[5], William Tobiska[6], Benjamin Hogan[6], Brad Gersey[6]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]State Scientifc Center of Russian Federation, Institute of Biomedical Problems, Moscow, Russia
[3]Department of Biology, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Möhrendorf, Germany
[4]DLR, Institute of Aerospace Medicine, Köln, Germany
[5]Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic
[6]Space Weather Division, Space Environment Technologies, Los Angeles, CA, USA
e-mail: tdachev59@gmail.com

Keywords: *Liulin spectrometer-dosimeters, space radiation, galactic cosmic rays, radiation belts*

Abstract: *The first Liulin-type spectrometers-dosimeter was developed in connection with the scientific program of the second Bulgarian cosmonaut Alexander Alexandrov in 1986–1988. It worked on the Mir space station from 1988 until 1994.*

Until 2022, 35 Liulin-type spectrometers-dosimeters were developed. Twenty one of them were tested and qualified for operation in space. Three of these twenty dosimeters did not reach the planned orbits around the Earth and Mars due to technical problems with the carriers. The scientific programs of 12 of these 20 Liulins were to measure the variations of the flux and dose rate of cosmic radiation on satellites, space stations in orbit around the Earth. Two instruments conducted measurements in interplanetary space and around the Moon and Mars: The RADOM instrument operated on the track to Moon and in circular orbit around the Moon. The Liulin-MO dosimeter is active since 2016 on the track and in a 400 km circular orbit around Mars. The scientific objectives of eight spectrometers were to support biological and chemical experiments in space with up-to-date information on the history of dose accumulation. This paper presents the most interesting scientific results on the dose and flux of cosmic radiation obtained recently.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОСМИЧЕСКАТА РАДИАЦИЯ С ПРИБОРИ ОТ ТИПА ЛЮЛИН В ПЕРИОДА 1989–2022 Г.

Цветан Дачев[1], Борислав Томов[1], Пламен Димитров[1], Юрий Матвийчук[1], Митьо Митев[1], Малина Йорданова[1], Йорданка Семкова[1], Виктор Бенгин[2], Вячеслав Шуршаков[2], Донат-Петер Хедар[3], Герда Хорнек[4], Гюнтер Райтц[4], Франтишек Спурни[5], Ондреж Плоц[5], Уйлям Тобиска[6], Бенжамин Хоган[6], Брад Герси[6]

[1]Институт за космически изследвания и технологии (ИКИТ) – Българска академия на науките
[2]Държавен научен център на Руската федерация, Институт по биомедицински проблеми, Москва, Русия
[3]Катедра по биология, Университет „Фридрих-Александър“ Ерланген-Нюрнберг, Мьорендорф, Германия
[4]Институт по аерокосмическа медицина, Кьолн, Германия
[5]Институт по ядрена физика на Чешката академия на науките, Прага, Чехия
[6]Отдел за космическо време, Технологии за космическа среда, Лос Анджелис, Калифорния, САЩ
e-mail: tdachev59@gmail.com

Ключови думи: *Спектрометри-дозиметри „Люлин“, космическа радиация, галактически космически лъчи, радиационни пояси*

Резюме: *Първият спектрометър-дозиметър от типа Люлин е разработен във връзка с научната програма на втория български космонавт Александър Александров през 1986–1988 г. Той работи на орбиталната станция „Мир“ в периода 1988–1994 г.*

До 2022 г. са разработени 35 дозиметъра от типа Люлин, 21 от които са тествани и квалифицирани за работа в космоса. Три от тези двадесет дозиметъра не достигат планираните орбити около Земята и Марс поради технически проблеми с носителите.

Научните програми на 12 от 20-те Люлини са измерване на вариациите на потока и мощността на дозата от космическа радиация на спътници и станции в орбити около Земята. Два от 12-те спектрометъра провеждат измервания в междупланетното пространство около Луната и Марс: Приборът RADOM работи по трасето и в орбита около Луната в периода 2008–2009 г. Приборът Люлин-МО е активен от 2016 г. досега по трасето до Марс и на 400 km кръгова орбита около Марс.

Научните програми на 8 от Люлините подкрепят биологични и химични експерименти в космоса с актуална информация за историята на натрупване на дозата космическа радиация. Тази статия представя най-интересни научни резултата за дозата и потока от космическа радиация, получени наскоро.

Introduction

Cosmic ionizing radiation is one of the main risks to human health in space. Galactic cosmic rays (GCRs) are the dominant radiation source in the space environment. GCRs are not rays at all, but charged particles that are generated by sources outside the Solar System such as neutron stars and supernovae. GCRs have the highest penetrating power among the main types of ionizing radiation. The energy of the particles (87% protons, 12% helium nuclei and 1% heavier ions) in GCRs ranges from a few tens to 10^{12} MeV per nucleon [1].

Another source of radiation in space are the solar energetic particles (SEPs) generated during solar eruptions. They are accelerated in sudden sporadic eruptions from the Sun's chromosphere and can accumulate even lethal doses for crews in interplanetary space and on the surfaces of the Moon and Mars. SEPs consist mainly of protons and a small percentage of helium and heavier ions. The maximum energy that SEPs reach is up to several GeV [2].

In the radiation belts, high-energy charged particles, trapped by the Earth's geomagnetic field, are found. The inner radiation belt (IRB) is located at heights between 1.1 and 2 Earth radii and consists of electrons with energies up to 10 MeV and protons with energies up to 700 MeV. The high doses of radiation in it limit the maximum altitude at which manned space stations could be located to the lower limit of the IRB, which is about 600 km from the Earth's surface.

The outer radiation belt (ORB) starts at about four Earth radii and extends to about 9–10 Earth radii in the direction of the Sun. It consists mainly of electrons with energies below 10 MeV that cannot penetrate the walls of the spacecraft, but could deliver large additional doses to cosmonauts and astronauts during work outside the station [3].

Theoretical calculations show that cosmic radiation doses during a flight to Mars could easily exceed the maximum permissible limits [4]. Therefore, experimental measurements of cosmic radiation doses during unmanned missions are of great importance for future planning of flights in interplanetary space and on the surface of the Moon and Mars.

Instruments Description

The first Liulin-type spectrometers-dosimeter was developed in connection with the scientific program of the second Bulgarian cosmonaut Alexander Alexandrov in 1986–1988. It worked on the Mir space station from 1988 until 1994.

Since 1989, Space Research and Technology Institute (SRTI-BAS), in an international cooperation with scientists from Russia, Germany, Japan, Czech Republic, Italy, Norway, Switzerland, Belgium, USA and India, etc., worked at mountain peaks, flew in space and on stratospheric balloons, rockets and aircraft with more than 35 Liulin-type spectrometers-dosimeter [5], (http://www.space.bas.bg/SollarTerrestialPhysics/files/Poster-IKIT-BAN-2019%20SZF.pdf). 21 of these Liulin-type spectrometers-dosimeters were developed, tested and qualified for operation in space.

The latest application of Liulin device are:

(a) The flight of Liulin-SET instrument on Japanese external module of THE International Space station (ISS) in March-December 2022 [6];

(b) The flight of the first commercial mission into suborbital space with the SpaceShipTwo spacecraft of Virgin Galactic Company (Virgin Galactic launches first commercial spaceflight (spacedaily.com). The flight took place on June 29th, 2023 at 08:00 a.m. MT or 03:00 p.m. GMT from Spaceport America in New Mexico, USA [7].

Liulin spectrometers contain one silicon-PIN diode of Hamamatsu S2744-08 type (2 cm^2 area and 0.3 mm thickness), one ultra-low noise charge-sensitive preamplifier of AMPTEK A225F type, and 2 microcontrollers (Please look a Fig. 2 of [5]).

The doses (deposited energies in the detector) are determined by a pulse height analysis technique then passed to a discriminator. According to AMPTEK A225 specifications, the pulse amplitudes A [V] are proportional by a factor of 240 mV/MeV to the energy loss in the detector and respectively to the dose. This is the key feature of the AMPTEK A225 preamplifier, which directly transfers the pulse amplitude, measured in volts by the spectrometer to dose and dose rate.

The amplitudes of all signals from the income particles and quanta are transformed into digital signals by ADC converter and are sorted into 256 channels by a multichannel analyzer. For every exposure interval, a single 256 energy deposited spectrum is collected.

Two microcontrollers, through specially developed firmware, manage the unit. Liulin communicates with a personal computer by a universal serial bus (USB) signal.

Two Liulin type spectrometer-dosimeters, Liulin-5 and Liulin-MO, are built as two detector telescopes [8, 9] under the scientific leadership of Prof. Dr.S. Jordanka Semkova.

The following method for calculations of the dose is used [5]: The dose D [Gy] by definition is one Joule of energy deposited in 1 kg of a mater or:

(1) $D = K.Sum(EL_i*i)_{ET}/MD,$

where MD is the mass of the detector in [kg] and EL_i is the energy loss in Joules in channel i. The energy loss in channel i is proportional to the number of events A_i in it multiplied by i. K is a coefficient.

Scientific Results

Radiation Sources Selection Procedures

The first selection procedure is described by Dachev et al. [10]. More sophisticated selection procedure is also published by Dachev et al. 2017 [11].

The following three primary radiation sources were expected and recognized by the data selection procedures designed for the Liulin instruments: (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.

Global Distribution of the Radiation Sources

Fig. 1 presents the averaged contour view of the global map of the flux data obtained with four Liulin type instruments as follows: LIULIN inside MIR space station (MIR SS) in March 1991; Liulin E94 inside Russian segment of the ISS in May 2001; R3DR2 outside the Russian segment of the ISS in June 2015 and Liulin-SET outside the Japanize Experimental Module of the ISS in October 2022.

Figure 1 illustrates: 1) the positions of the primary radiation sources and 2) explores the secular movement of the center of SAA region of the Inner Radiation belt toward North-West direction.

The first panel of Fig. 1 (a, In ("In" means inside the MIR SS)) shows the two flux rates sources: a) the GCR particles and their secondary and b) the IRB energetic protons, trapped in the Earth magnetic field in the region of the SAA. The smallest GCR flux rates (less than 0.13 cm^{-2} s^{-1}) are observed in the low latitude region, while the largest (up to 25-μGy h^{-1}) are observed in the high latitude regions. Similar is the distributions of the fluxes observed with Liulin-E094 instrument inside the American Laboratory module of the ISS seen in the second panel (Fig. 1 b, In).

The bottom panels of the figure present data registered while R3DR2 and Liulin-SET instruments are outside the ISS. The significantly smaller shielding allows energetic electrons from the ORB to reach the detector. New patches in the high latitude of the global map appear [10] in Fig. (1c, Out). These patches are labeled with "ORB". They appears in both hemispheres. The ORB patch in Southern hemisphere at longitudes 0°–35° East longitude is created during magnetic storm events. The presence of energetic protons during Solar Energetic Particle Events (SEP), is also seen in the high latitudes of the global map [12].

Secular Movement of the Center of South Atlantic Anomaly

Due to the secular evolution of the geomagnetic field, the location of the SAA slowly changes.

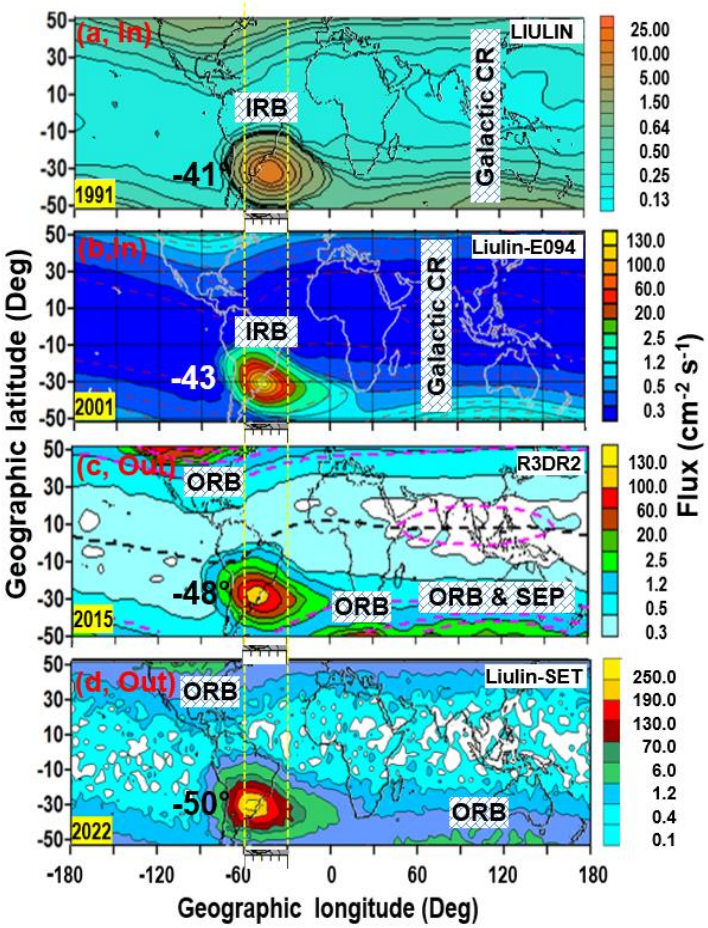


Fig. 1. Averaged contour view of the global map of the flux data obtained with four Liulin type instruments on MIR SS and ISS in the period March 1991 – October 2022

The SAA center shows a westward drift. However, the drift speed is different: the location of minimum of geomagnetic field drifts 0.18° per year; while the particle flux maximum drifts 0.3° per year. The numerous observations of particle flux show that the center of South Atlantic Anomaly drifts westward, while the meridional movements are not consistent [12].

Two vertical, dotted, yellow lines are drawn in all four panels of Fig. 1. Their positions are at -30° and -60° West longitude. Between these lines a better resolution scale of X-axis with 6-degree step is drawn. Using it, the West longitude of the SAA is found at every panel. The results are shown on the left side from -60° West longitude. The values there are from top to bottom -41°, -43°,-48° and -50°. The calculated difference is 9° for 31 years from 1991 and 2022. The yearly drift rate is 9/31=0.29° per year. This value is very close to the overviewed in [13].

Geomagnetic Storm Effects Observed with R3DR2 Instrument outside the ISS in 2014-2016

Figure 2 presents two 3-dimensional L value versus time plots of the average ORB and IRB flux rates in cm^{-2} s^{-1} against the color bar in the middle-right part of the figure between October 24, 2014 and December 24, 2015.

The upper panel of the figure presents the ORB relativistic electrons more than 0.835 MeV flux variations, while the lower panel the IRB more than 19.5 MeV proton flux variations. The plotted values in the 2 panels, are the average observed per day per the bin flux values. The bins with size of 0.02 L value units are organized in a 442 daily vertical bars, which are plotted against the date form the two 3 dimensional plots.

In the upper panel with heavy white line are plotted the daily Dst index variations (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html). Along the bottom-right vertical axes of the lower panel with heavy white line is plotted the daily average altitude of the station, which was obtained for the locations of the daily average IRB flux.

The ISS average flux bins cover the whole L values range from 1 to 6 in the Southern hemisphere, while in the Northern hemisphere the flux data bins are extended only up to L = 4.7, because the Earth magnetic field hemisphere asymmetries. This explains the borderline seen in Fig. 4a at L = 4.7 and the smaller population of the bins in the L range between 4.7 and 6.

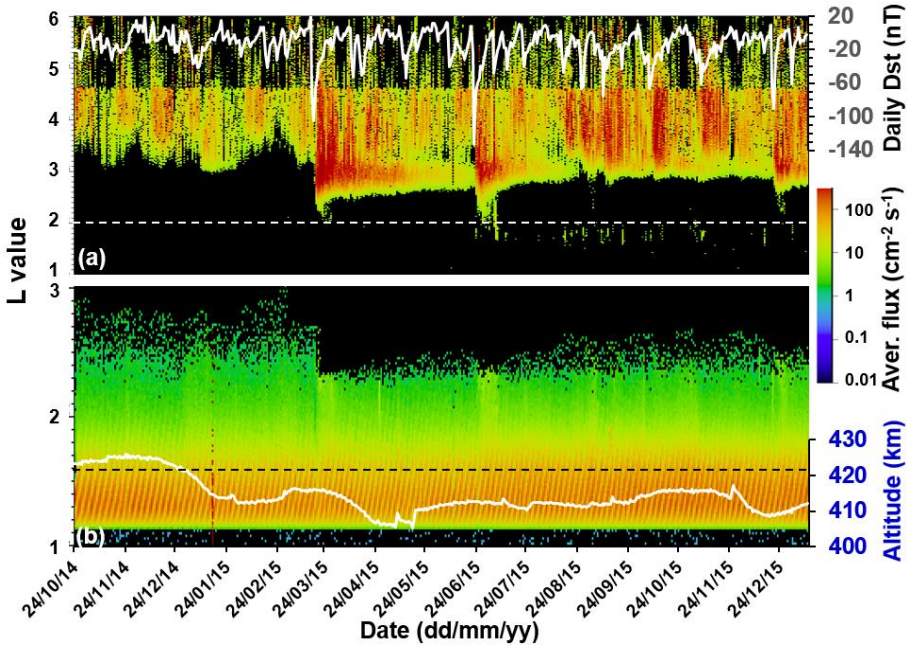


Fig. 2. The 3-dimensional L value versus time plot presents the average observed in the bin flux rate in cm^{-2} s^{-1} against the color bar in the middle-right part of the figure

Following peculiarities and geomagnetic activity effects are seen in the Fig. 2 panels:

- **Fig. 2a:**

– The measured by the R3DR2 instrument ORB flux rates in the range 3.3–11,814 cm^{-2} s^{-1} with average value of 85 cm^{-2} s^{-1} dominate the IRB rates, which are in the range 0.15–304 cm^{-2} s^{-1} with an average value of 35.9 cm^{-2} s^{-1};

– Two periods are clearly seen. In the relatively "quiet" period between October 24, 2014 and the middle of March 2015, the ORB flux time and space variations are relatively small and varied in the interval between 1 and 50–60 cm^{-2} s^{-1}. In this period, the equatorward boundary of the ORB vary in the interval of L values between 3 and 4. The ORB relativistic electrons equatorward boundary never penetrate at L values below 3;

– The penetration of relativistic electrons down to L values below 2 and the strong temporary enhancements of the maximal flux, seen in the 3D plot of Fig. 2a, usually take place in the main phase of the magnetic storm, when the negative value of Dst is large. (In Fig. 2 the daily Dst index variations (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html) in nT are depicted as white line against the upper-right vertical axes.) Later, during the recovery phase of the magnetic storm, the ORB equatorial boundary moved from about L = 2.4 back to L = 3.0. These features were repeatedly registered during the storms in March, June and December 2015. Most of the time the ORB was with single maximum distribution in the L profile but after the storms in March and June 2015, periods with two maxima were registered. Although not well visible, the best example of two maxima L distribution profile, seen in Fig. 2a, is the period between May 20 and June 20, 2015. The two maxima L distribution profiles were detected mainly in the southern hemisphere and are similar to the "third" Van Allen radiation belt phenomena, recently explained by Mann et al. [14];

– Similarly to Claudepierre et al. [15] and Turner et al. [16], we have recorded penetration of the relativistic electrons below L = 2.5 on 18 March 2015. In the period March 18–28 2015, the lower boundary of L = 2 was reached. After that period, the relativistic electrons at low L disappeared on March 28th 2015. The storm on June 25th generated again fluxes of the ORB relativistic electrons at L values below 2 and they are clearly seen in Fig. 2a. The ORB enhancement on 4th July 2015 emphasized them again but at this case the minimal L values reached was L = 1.6. Almost all disturbances in the Dst from July 11th, 2015 until December 2015 generated a new portion of relativistic electrons in the range of L values between 1.6 and 2. They existed for 1–2 days and disappeared until the next Dst disturbance.

- **Fig. 2b:**

– The flux rates in the SAA maximum at L values between 1.2 and 1.4 strongly depend on the altitude of the station, presented with heavy white line in Fig 2b against the lower-right axes in the figure. The maximum flux values in the period 24 October–24 December 2014 is connected with the highest altitudes of the station above 420 km in this period. The wide maximum, between June 2015 and till the end of the graph, is generated not only by the relative high altitudes but also by the smaller solar activity, which lowered the neutral atmosphere density and decrease the sink of the IRB energetic protons;

– The "quiet" and disturbed periods in Fig. 2b are also clearly seen. During the "quiet" period the poleward boundary of the inner radiation belt extends up to L = 3. The first strong magnetic storm on 17th of March 2015 decreases the IRB poleward boundary down to L = 2.3. During the months April, May and partly June the boundary slowly moves back to level of L = 2.5. Next strong storm in June push it again down to level of L = 2.3. In the period between July and December the boundary extends back to value of L = 2.7. Next relatively smaller storm on 21st of December bring it down to L = 2.5. Very scrupulously comparison between the ORB equatorward and IRB poleward boundaries shows that they move simultaneously in same direction with different L value rate;

– During the main phases of the storms on 17 March and 25 June 2015 is seen a decrease of the IRB fluxes in the whole L value range;

– During the recovery phases reverse process of enhancement of the IRB fluxes also in the whole L value range takes place.

Long-term Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays (GCR) Distribution

The long-term solar modulation of GCR is observed experimentally and already published for the period 1991–2019 [17]. On Figure 3 we update these results by data from the Liulin-SET instrument from September 2022 [6].

The total number of measurements exceeds 12,000,000. Most of them are available free from the "Unified Web-based Database with Liulin-type Instruments" at http://esa-pro.space.bas.bg/database. As the paper is focused on the L values between 4 and 6.2, only 613,397 measurements are used for this study.

Data collected in 15 space experiments, covering three decades and almost three solar cycles were obtained using the same type of devices, which makes the results comparable.

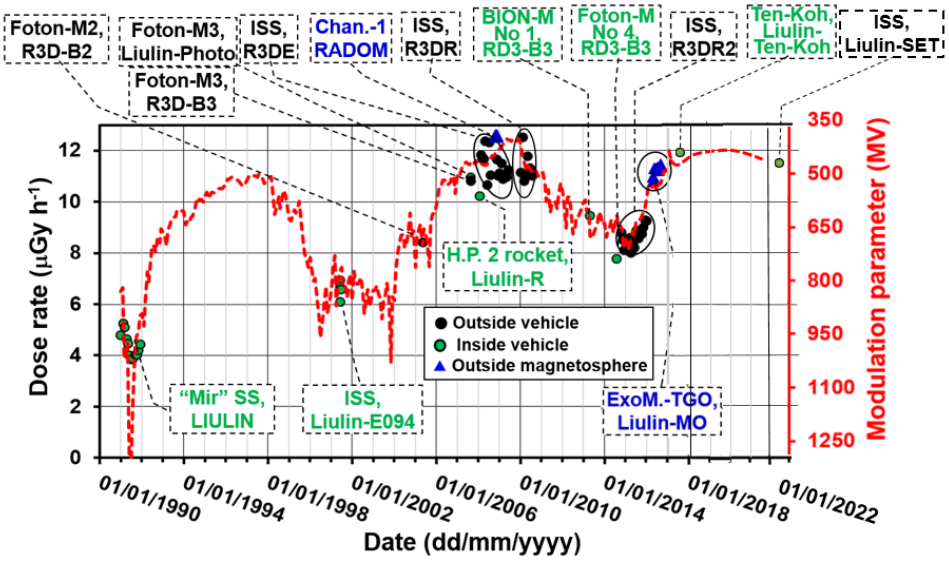


Fig. 3. Long-term variations of the averaged dose rates observed in the L range between 4 and 6.2 (black and dark-green points) or outside the magnetosphere (blue triangles) during 15 experiments between 1989 and 2022. The Liulin data are compared with the monthly values of the modulation parameter (red line) in MV.

Conclusions

The most important advantage of this study is that electronically identical Liulin type instruments obtain the data sets. These experimentally gotten flux and dose rate data could be used for modelling of the space radiation risks to humans in the near Earth radiation environment.

Acknowledgements:

Most of the data, used in this paper, are part of the "Unified Web-Based Database with Liulin-type Instruments", which are available online, free of charge at the following URL: https://esa-pro.space.bas.bg/database.

References:

1. Simpson J.A., in: Shapiro M.M. (Ed.) Composition and origin of cosmic rays, NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences. Vol. 107, Reidel, Dordrecht, 1983
2. Anastasiadis, A., Lario, D., Papaioannou, A., Kouloumvakos, A. and Vourlidas, A., Solar energetic particles in the inner heliosphere: status and open questions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, *377*(2148), p. 20180100, 2019. Dachev, T.P., Relativistic Electron Precipitation Bands in the Outside Radiation Environment of the International Space Station, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 177, 247-256, 2018, https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.008
3. Häder, D.P., et al., R3D-B2 – Measurement of ionizing and solar radiation in open space in the BIOPAN 5 facility outside the FOTON M2 satellite, Adv. Space Res. 43, 1200–1211, 2009. doi:10.1016/j.asr.2009.01.021
4. Semkova, J., 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, Volume 303, 15 March 2018, Pages 53–66, 2018. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034
5. Dachev, T. P., et al., Overview of the Liulin type instruments for space radiation measurement and their scientific results, Life Sciences in Space Research, 4, 92–114, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2015.01.005
6. Tobiska, K., et al., International space station radiation field measurements by Liulin-SET spectrometer of ARMAS flight module 9 in 2022, 20th Proceedings of the Twentieth International Scientific Conference "SPACE, ECOLOGY, SAFETY" – SES 2024, pp. 16–22, October, 2024, Sofia, Bulgaria
7. Dachev, T., Carlucci, P., Cairo, F., Tomov, B., Matviichuk, Y., Dimitrov, P., Mitev, M., Jordanova, M. and Paciucci, L., 2025. Space radiation measured during first-ever commercial suborbital mission on Virgin Galactic SpaceShipTwo Unity on 29 June 2023. *Life Sciences in Space Research*, *44*, pp. 126-133, https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.09.003
8. Semkova, J., R. Koleva, St. Maltchev, G. Todorova, Ts. Dachev, V. Benghin, V. Shurshakov, V. Petrov, Calibration results of Liulin-5 charged particle telescope obtained in ICCHIBAN-7 experiment. New instrumentation for radiation monitoring on interplanetary missions, presented at the 11th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station (WRMISS) held in Oxford, UK, September 6–8, 2006. chrome- https://wrmiss.org/workshops/eleventh/Semkova.pdf
9. Semkova, J., Koleva, R., Benghin, V., Dachev, T., Matviichuk, Y., Tomov, B., Krastev, K., Maltchev, S., Dimitrov, P., Mitrofanov, I. and Malahov, A., *2018.* 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, Volume 303, 15 March 2018, Pages 53–66,* https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034
10. Dachev, Ts., G. Horneck, D.-P. Häder, M. Lebert, P. Richter, M. Schuster, R. Demets, 2012b. Time profile of cosmic radiation exposure during the EXPOSE-E mission: the R3D instrument, Journal of Astrobiology, 12, 5, 403-411, http://dx.doi.org/10.1089/ast.2011.0759
11. 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
12. Dachev, T.P., B. T. Tomov, Yu. N. Matviichuk, Pl. G. Dimitrov, N.G. Bankov, High dose rates obtained outside ISS in June 2015 during SEP event, Life Sciences in Space Research, 9, 84–92, 2016, http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2016.03.004
13. Ye, Y., Zou, H., Zong, Q., Chen, H., Wang, Y., Yu, X. and Shi, W. The secular variation of the center of geomagnetic South Atlantic Anomaly and its effect on the distribution of inner radiation belt particles. Space Weather, 15(11), pp. 1548–1558, 2017
14. Mann, I.R., Ozeke, L.G., Murphy, K.R., Claudepierre, S.G., Turner, D.L., Baker, D.N., Rae, I.J., Kale, A., Milling, D.K., Boyd, A.J. and Spence, H.E., Explaining the dynamics of the ultra-relativistic third Van Allen radiation belt. Nature Physics, 12(10), pp. 978–983, 2016
15. Claudepierre, S.G., O'Brien, T.P., Fennell, J.F., Blake, J.B., Clemmons, J.H., Looper, M.D., Mazur, J.E., Roeder, J.L., Turner, D.L., Reeves, G.D. and Spence, H.E., The hidden dynamics of relativistic electrons (0.7–1.5 MeV) in the inner zone and slot region. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122(3), pp. 3127–3144, 2017
16. Turner, D.L., et al., Investigating the source of near-relativistic and relativistic electrons in Earth's inner radiation belt. J. Geophys. Res. Space Phys. 122, 695–710. 2017
17. Dachev TP, Tomov BT, Matviichuk YN, Dimitrov PG, Semkova JV, Koleva RT, Jordanova MM, Bankov NG, Shurshakov VA, Benghin VV. Solar modulation of the GCR flux and dose rate, observed in space between 1991 and 2019. Life Sciences in Space Research. Aug 1; 26:114–24, 2020.

Session 1

Space Physics

Chairmen: Prof. Tsvetan Dachev,
Corr. Member Peter Velinov
Secretary: Assoc. Prof. Daniela Boneva

CORIMIA IONIZATION MODEL – THREE INTERVAL APPROXIMATION FOR COSMIC RAY PROTONS (Z = 1)

Peter I. Velinov, Simeon Asenovski, Lachezar Mateev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: peteriyvelinov@gmail.com, asenovski@space.bas.bg, lnmateev@bas.bg

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-interval approximation of the ionization loss function dE/dh is presented for cosmic ray protons with charge Z = 1. The approach extends the previous two-interval model by introducing a third interval for higher particle energies (E_k > 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 ray protons within the CORIMIA framework.*

ЙОНИЗАЦИОНЕН МОДЕЛ CORIMIA – ТРИ-ИНТЕРВАЛНА АПРОКСИМАЦИЯ ЗА ПРОТОНИ (Z = 1)

Петър И. Велинов, Симеон Асеновски, Лъчезар Матев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: peteriyvelinov@gmail.com, asenovski@space.bas.bg, lnmateev@bas.bg

Ключови думи: *Йонизация от Космически Лъчи, Модел CORIMIA, Три-Интервална Аппроксимация, Функция На Енергийните Загуби, Йонизация от Протони, Атмосферна Йонизация*

Резюме: *Йонизационният Моделът CORIMIA се използва за описание на процеса на йонизация в земната атмосфера, предизвикан от космическите лъчи. В настоящото изследване е представена три-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 (E_k > 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 протоните в състава на космическите лъчи.*

Introduction

Cosmic rays are high-energy charged particles originating from galactic, solar, and interstellar sources. Upon entering the Earth's atmosphere, they interact with atmospheric constituents, producing cascades of secondary particles that contribute to atmospheric ionization and chemical changes [1]. The ionization caused by cosmic rays plays a fundamental role in atmospheric electricity, cloud microphysics, and long-term climate variability [2].

Depending on their origin and energy, cosmic rays are generally divided into three main components: Galactic Cosmic Rays (GCRs), Solar Energetic Particles (SEPs), and Anomalous Cosmic Rays (ACRs). The GCRs dominate during quiet solar conditions and provide the background ionization at all latitudes. SEPs are transient, event-related fluxes associated with solar flares and

coronal mass ejections, while ACRs represent a lower-energy component accelerated at the heliospheric boundary [3÷5].

The differential energy spectra of these components are shown in Figure 1, where the typical fluxes of GCRs during solar maximum and minimum are compared with representative SEP and ACR spectra. As illustrated, galactic protons and alpha particles contribute most significantly in the range between 0.1 and 10 GeV, which corresponds to the energy interval most relevant for atmospheric ionization processes.

Accurate modeling of cosmic ray ionization requires a detailed description of the energy loss of charged particles as they penetrate the atmosphere. The CORIMIA (Cosmic Ray Ionization Model for the Atmosphere) model provides such a framework by analytically integrating the energy loss function (*1/ρ*)(*dE/dh*) over the primary energy spectrum, accounting for geomagnetic shielding and solar modulation effects [6]. The precision of this approach strongly depends on the adopted approximation of the ionization loss function, which determines the rate of energy dissipation with atmospheric depth.

Previous studies employed a two-interval approximation based on the Bethe–Bloch theory [7], successfully reproducing the observed ionization at low and medium energies. However, at higher kinetic energies (E_k > 5 GeV), deviations become noticeable. Therefore, a three-interval approximation has been developed to extend the applicability of CORIMIA for high-energy protons (Z = 1), providing better continuity and improved representation of the ionization loss function across a wide energy range [8].

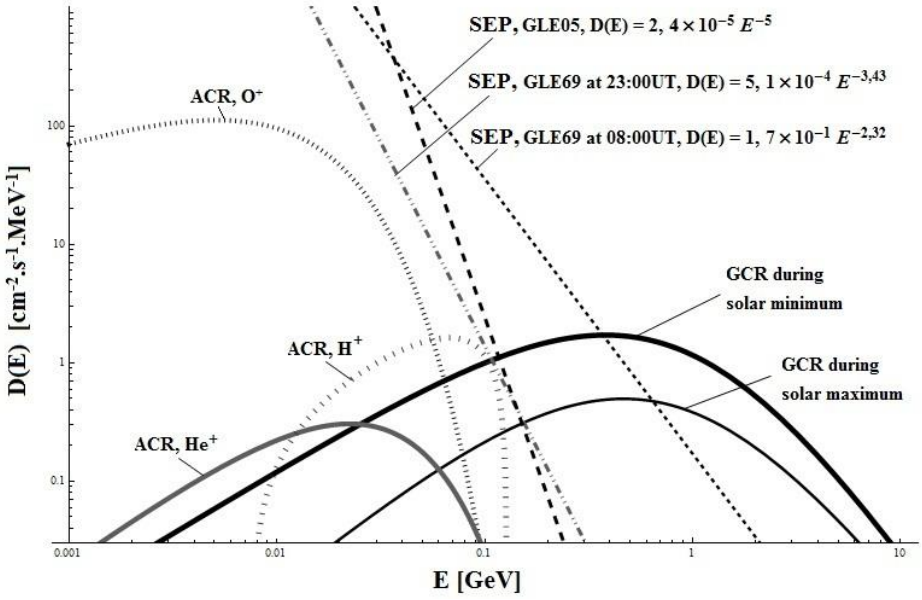


Fig. 1. Differential energy spectra of Galactic Cosmic Rays (GCR), Solar Energetic Particles (SEP), and Anomalous Cosmic Rays (ACR) for different particle species and solar conditions

Ionization Function and Model Formulation

The ionization rate in the Earth's atmosphere produced by cosmic ray particles is determined by their energy loss per unit mass thickness, expressed as:

$$q(h) = \left(\frac{\rho(h)}{Q}\right) \int_{E_{cut}}^{\infty} D(E) \left(\frac{dE}{dh}\right) dE, \quad (1)$$

where *ρ(h)* is the atmospheric density at altitude *h*, *D(E)* is the differential cosmic ray spectrum, *Q* is the mean energy required for the creation of an ion pair (*Q* = 35 eV), and E_{cut} is the effective cut-off energy determined by geomagnetic and atmospheric shielding.

The CORIMIA (COsmic Ray Ionization Model for the Atmosphere and Ionosphere) model evaluates q(h) for various charged particles ($Z \geq 1$) using analytical expressions for the ionization loss function dE/dh. Following the approach of [3, 4], the model separates the particle energy range into characteristic intervals where the dependence of *dE/dh* on *E* can be approximated by power laws.

Energy Loss Function

For protons (Z = 1), the energy loss function is expressed as:

(2) $$-\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{dE}{dh}\right) = A_i \cdot E^{-\alpha_i},\ E_{i-1} \le E < E_i,$$

where A_i and α_i are constants determined for each interval iii. In the three-interval approximation, the limits are chosen as:

(3) $$E_1 = 0.15\ GeV,\ E_2 = 0.6\ GeV,\ E_3 = 5.0\ GeV.$$

Thus, the function becomes:

(4) $$-\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{dE}{dh}\right) = \begin{cases} 242 \cdot E^{-\frac{3}{4}}, & 0.15 \le E < 0.6\ GeV \quad Interval\ 1 \\ 2, & 0.6 \le E < 5.0\ GeV \quad Interval\ 2 \\ 0.7 \cdot E^{0.123}, & E \ge 5.0\ GeV \quad Interval\ 3 \end{cases}$$

These intervals correspond respectively to low-energy, intermediate, and high-energy domains of cosmic ray protons.

Penetration Depth and Atmospheric Cut-off

The quantity of matter traversed by a particle is given by the integral:

(5) $$\hbar = \int_{E_k}^{E_c}\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{dE}{dh}\right)dE,$$

which defines the penetration depth as a function of the particle's initial energy E_k. Using the above approximation, analytical expressions for $\hbar(E_k)$ are derived for each interval. For example, for $E_k \ge 5$ GeV:

(6) $$\hbar = \hbar 3 = \left(\frac{1}{0.7}\right)\int_{E(h)}^{E_k}\left(\frac{dE}{E^{0.123}}\right) = \left(\frac{1}{0.7\times 0.877}\right)(E_k^{0.877} - \mathrm{E}_3(0.877)(h)),$$

and the inverse relation gives the energy of the particle at a given depth:

(7) $$E_3(h) = (E_k^{0.877} - 0.61 \cdot \hbar)^{1.14}.$$

These relations provide the atmospheric energy thresholds and are further used to calculate q(h) through integration over the cosmic ray spectrum.

The three-interval approximation thus improves the description of energy loss processes for low, medium, and high energies, ensuring a more accurate estimation of the ion production rate in the middle and upper atmosphere. The resulting formulation is implemented in the CORIMIA model and serves as the basis for subsequent calculations of ionization profiles under quiet and disturbed heliospheric conditions.

Three-Interval Approximation for Cosmic Ray Protons (Z = 1)

The ionization rate in the atmosphere depends strongly on the spectrum of primary cosmic ray particles and the energy-dependent ionization losses during their propagation. For charged particles with Z = 1 (protons), the energy loss function *dE/dh* is approximated by three characteristic intervals according to Equation (4). This approach extends the previous two-interval model by including a high-energy domain that improves the description above 5 GeV, where relativistic effects and deep penetration become significant.

Atmospheric Cut-off Energies and Depth Relations

The atmospheric cut-off represents the depth (or equivalent mass thickness) at which a cosmic ray particle of given kinetic energy EkE_kEk is completely absorbed or loses its ability to ionize the atmosphere effectively. For the three-interval approximation, the total penetration depth is expressed as the sum of contributions from each interval:

(8) $$\hbar = \hbar_1 + \hbar_2 + \hbar_3 = \left(\frac{1}{242}\right)\int_{0.15}^{0.6}\left(\frac{dE}{E^{0.75}}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\int_{0.6}^{5.0} dE + \left(\frac{1}{0.7}\right)\int_{5.0}^{E_{a3}(h)}\left(\frac{dE}{E^{0.123}}\right).$$

Evaluating these integrals gives:

(9) $$\hbar = \left(\frac{1}{423.75}\right)\left(600^{\frac{7}{4}} - 0.15^{\frac{7}{4}}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)(5.0 - 0.6) + \left(\frac{1}{0.61}\right)\left({E_{a3}}^{0.877} - 5.0^{0.877}\right).$$

From this relation, the atmospheric cut-off energy in the third interval is derived as:

(10) $$E_{a3}(h) = (297.9 + 0.61\hbar)^{1.14}.$$

This expression defines the lower energy boundary for protons penetrating into Interval 3 (E ≥ 5 GeV).

Transition Between Intervals

When the particle energy passes through the boundaries at 600 MeV or 5 GeV, separate relations describe the behavior in the overlapping regions between intervals:

(11) $$\hbar = \hbar_2 + \hbar_3 = \left(\frac{1}{2}\right)\int_{E_{32}(h)}^{5.0} dE + \left(\frac{1}{0.7}\right)\int_{5.0}^{E_k}\left(\frac{dE}{E^{0.123}}\right),$$

which yields the energy for the 5 GeV transition as:

(12) $$E_{32}(h) = 5.0 - 2\hbar + 3.28(E_k^{0.877} - 5.0^{0.877}).$$

Similarly, when the particle crosses both interval boundaries (600 MeV and 5 GeV), the total depth is:

(13) $$\hbar = \hbar_1 + \hbar_2 + \hbar_3 = \left(\frac{1}{242}\right)\int_{E_{32}(h)(h)}^{0.6}\left(\frac{dE}{E^{0.75}}\right) + \left(\frac{1}{2}\right)\int_{0.6}^{5.0} dE + \left(\frac{1}{0.7}\right)\int_{5.0}^{E_k}\left(\frac{dE}{E^{0.123}}\right).$$

and the corresponding energy boundary becomes:

(14) $$E_{31}(h) = \left(600^{\frac{7}{4}} - 423.75\hbar + 211.88(5.0 - 0.6) + 694.67(E_k^{0.877} - 5.0^{0.877})\right)^{\frac{4}{7}}.$$

Special Cases for Boundary Transitions

For the 600 MeV boundary, when the incoming particle energy lies in Interval 2:

(15) $$\hbar = \left(\frac{1}{2}\right)\int_{0.6}^{E_{600,2}} dE = \left(\frac{1}{2}\right)\left(E_{600,2} - 0.6\right) \rightarrow E_{600,2} = 0.6 + 2\hbar.$$

When the energy belongs to Interval 3, the relation becomes:

(16) $$\hbar = \left(\frac{1}{2}\right)(5.0 - 0.6) + \left(\frac{1}{0.61}\right)\left(E_{600,3}^{0.877} - 5.0^{0.877}\right),$$

and hence:

(17) $$E_{600,3} = \left(0.61\hbar + 5.0^{0.877} - 0.3(5.0 - 0.6)\right)^{1.14}.$$

Finally, for the 5 GeV boundary, when the particle enters from infinity:

(18) $$\hbar = \left(\frac{1}{0.7}\right)\int_{5.0}^{E_{5000,3}}\left(\frac{dE}{E^{0.123}}\right) = \left(\frac{1}{0.61}\right)\left(E^{0.877}{}_{5000,3} - 5.0^{0.877}\right).$$

and the corresponding relation is:

(19) $$E_{5000,3} = (5.0^{0.877} + 0.61\hbar)^{1.14}.$$

Discussion

Figure 2 illustrates the three-interval approximation of the ionization energy loss function (*1/ρ*)(*dE/dh*) for cosmic ray protons (*Z* = 1) in the CORIMIA model. Each colored region corresponds to a distinct energy domain:

- the low-energy interval (0.15–0.6 GeV), where the ionization losses follow a steep inverse power law,
- the intermediate interval (0.6–5 GeV), characterized by nearly constant specific losses, and
- the high-energy interval (> 5 GeV), where relativistic corrections modify the loss function toward a slow rise with energy.

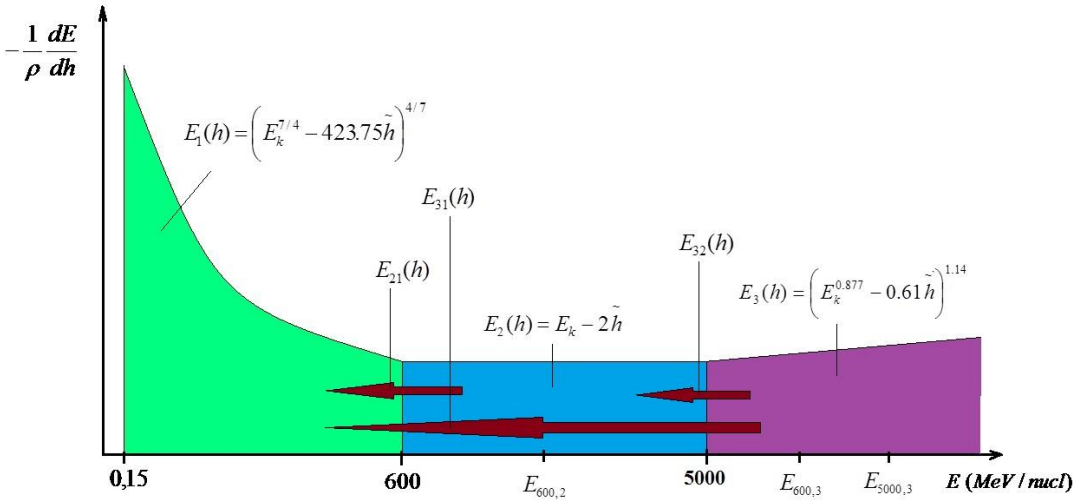


Fig. 2. *Three-interval approximation of the ionization energy loss function for cosmic ray protons (Z = 1). The curves $E_1(h)$, $E_2(h)$, and $E_3(h)$ correspond to the laws of energy losses for the individual intervals, while $E_{21}(h)$, $E_{32}(h)$, and $E_{31}(h)$ represent the transition cases where the kinetic energy of the ionizing particles crosses one or two energy boundaries*

The analytical relations $E_1(h)$, $E_2(h)$, and $E_3(h)$ describe the evolution of particle energy with atmospheric depth for each interval. The additional functions $E_{21}(h)$, $E_{32}(h)$, and $E_{31}(h)$ define the transitional cases when the penetrating proton crosses one or two boundaries between adjacent intervals. These relations ensure continuity of the energy–depth dependence and prevent artificial discontinuities in the total ionization rate *q(h)*, which was a limitation of earlier two-interval models.

Physically, the three-interval approach captures the different regimes of proton–air interactions.

At low energies, the stopping power is dominated by ionization and excitation processes following the Bethe–Bloch law; in the mid-energy range, the specific loss per unit path becomes nearly constant; and at relativistic energies, energy losses increase again due to radiative and density-effect corrections.

This behavior determines the shape of the ionization profile in the atmosphere, particularly above the Pfotzer maximum.

By integrating the loss function over the differential proton spectrum *D(E)*, the CORIMIA model provides altitude-dependent ionization rates that are consistent with empirical data and Monte Carlo simulations [3, 4]. The implementation of the third energy interval improves the accuracy of the calculated ionization rate in the upper stratosphere and mesosphere, where the contribution of high-energy protons becomes significant. This extension is especially relevant for space weather studies, as it allows the model to simulate both quiet-time galactic cosmic ray ionization and event-driven enhancements from solar energetic particles (SEPs).

Conclusions

The three-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 $E_i(h)$ and $E_{ij}(h)$ yield compact formulas for the atmospheric cut-off energies and penetration depths. These relations can be used in both forward modeling and inverse reconstruction of particle energy spectra from observed ionization profiles. The CORIMIA model, supplemented by the present three-interval approximation, therefore offers a robust framework for studying ionization processes across the full range of cosmic ray proton energies, linking theoretical physics with practical space climate applications.

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.

ACCURATE DETERMINATION OF THE BOUNDARIES OF THE INTERVALS IN WHICH SITUATIONAL CONDITIONS ARE FULFILLED. ALGORITHM AND SUBROUTINES

Atanas Marinov Atanassov

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

Keywords: *Space Mission Analysis and Design (SMAD); situational analysis, situational conditions*

Abstract: *Computer simulations are applied at various stages of space mission preparation. Situational analysis is extremely important for assessing/evaluating the possibilities for conducting measurements, based on which a relevant scientific problem can be solved. A computational tool is being developed to solve numerous situational problems. By solving such type of problems check the occurrence of suitable conditions for measurements in the course of the movement of satellites along their orbits. Each situational problem is considered as compiled of one or a conjunction of several situational conditions. Situational conditions are represented by geometric models that include specific parameters and constraints. From a mathematical point of view, they represent predicate functions. Within the framework of simulation models of space missions, situational conditions are checked with a step in the system time, coinciding with the step of numerical integration of the equations of motion of the satellites. When using a larger step, to reduce computational costs, the determination of the boundaries of the time intervals in which the situational conditions are fulfilled may turn out to be too rough. Given the speeds with which a satellite moves in near-Earth space, its location at the beginning and end of an open interval thus determined may differ by hundreds of kilometers. The text of the report presents an algorithm for specifying the boundaries of the interval. The subroutines developed for this purpose, which are applicable to different situational conditions, are shown.*

ТОЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ГРАНИЦИТЕ НА ИНТЕРВАЛИТЕ, В КОИТО СЕ ИЗПЪЛНЯВАТ СИТУАЦИОННИ УСЛОВИЯ. АЛГОРИТЪМ И ПОДПРОГРАМИ

Атанас Маринов 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; ситуационен анализ, ситуационни условия*

Резюме: *Компютърните симулации се прилагат на различни етапи от подготовката на космически мисии. Ситуационният анализ е изключително важен за преценка/оценка на възможностите за провеждане на измервания, на основата на които да може да се реши съответна научна задача. Разработва се изчислителен инструмент за решаване на ситуационни задачи. Чрез такъв тип задачи се проверява възникването на подходящи условия за измервания в ода на движението на спътниците по съответните им орбити. Всяка ситуационна задача се разглежда като съставена от едно или конюнкция от няколко ситуационни условия. Ситуационните условия се представят най-често с геометрични модели включващи параметри и ограничения. От математическа гледна точка, те представляват предикатни функции. В рамките на симулационни модели на космически мисии, ситуационните условия се проверяват със стъпка по системното време, съвпадащо със стъпката на числено интегриране на уравненията на движение на спътниците.При използване на по-голяма стъпка, с цел да се намалят изчислителните разходи, определянето на границите на времевите интервали, в които се изпълняват ситуационните условия, може да се окаже твърде грубо. Предвид скоростите с които един спътник се движи в около-земното пространство, местоположението му в така определените начало и край на открит интервал може да се отличава със стотици километри. В текста на доклада е представен алгоритъм за уточняване на границите на интервала. Показани са разработените за целта подпрограми, които са приложими за различни ситуационни условия.*

Introduction

Computer simulations are performed to clarify various aspects related to the orbital motions of satellites, constructive and functional parameters of space and ground-based subsystems, and payloads, at different stages of space mission preparation. This analysis falls under a separate scientific field, part of space research, known as Space Mission Analysis and Design (**SMAD**) [1]. The Situational Analysis (**SA**) is a crucial component of **SMAD**. It focuses on identifying time intervals or specific moments when conditions are suitable for conducting satellite operations or other orbital events.

A multiphysics programming environment for computer simulations of multi-satellite missions is under development at the Space Research and Technology Institute, BAS. The Parallel Situational Analysis Solver (**PSAS**) is an essential calculation tool within this environment. Mathematical models of diverse situational conditions are being developed, which are necessary for carrying out analyses with the **PSAS**.

State of the problem

Situational analysis studies and establishes the occurrence in the course of orbital movements of satellites of conditions suitable for the performance of satellite operations (measurements, experiments, communications, space debris close approach risk, etc). One situational task may include one or more conditions sc:

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

The conditions sc_i themselves are predicate functions accepting values of ***truth*** or ***false***. Accurately determining the beginning t_b and end t_e of time intervals when situational conditions are met is an additional but important task of the analysis. Situational condition checks are performed for each time step, after integrating the satellite equations of motion.

At velocities of the order of several kilometres per second at which space objects travel (depending on the altitudes at the points on the orbit), the distances travelled per integration step can be of the order of hundreds of kilometres. Determining the boundaries of time intervals (t_b, t_e) when the situational conditions are met, based on the coordinates of the satellites, determined with a step Δt of the order of tens of seconds and one to two minutes, may be associated with large inaccuracies. Naturally, these boundaries are somewhere within a time interval $(t - \Delta t, t)$ and they should be searched for when events related to the detection of entry and exit from the searched interval occur.

Passage of a satellite through the radio area of a ground station

An approach to determine the boundaries of time slots will be demonstrated based on the requirement that a satellite passes through the radio visibility zone of a ground communication station located at geographical coordinates φ (latitude) and λ (longitude). We will define the station's radio visibility zone by the angle θ^* relative to the zenith (or by the angle δ above the horizon; $\theta^* = .5 * \pi - \delta$ (Figure 1). The condition δ > 0 is imposed to avoid disturbance and information loss.

$$Rz_{station}(1) = Rz * \boldsymbol{SIN}(.5 * \pi - \varphi) * \boldsymbol{COS}(\lambda + \omega * t)$$
$$Rz_{station}(2) = Rz * \boldsymbol{SIN}(.5 * \pi - \varphi) * \boldsymbol{SIN}(\lambda + \omega * t)$$
$$Rz_{station}(3) = Rz * \mathbf{COS}(.5 * \pi - \varphi)$$

In the last formulas ω is angular rotation velocity of the Earth. For the radius vector of the satellite $\vec{R}s_{top}$ in the topocentric coordinate system associated with the observation station, we may write down:

$$\vec{R}s_{top} = \vec{r}_s - \vec{R}z_{station},$$

where $\vec{r}_s$ and $\vec{R}z_{station}$ are the radius vectors of the satellite and the station in the geo-equatorial coordinate system. Then, for the angle Θ between the vectors $\vec{R}s_{top}$ and $\vec{R}z_{station}$ we have:

$$COS(\theta) = \vec{R}s_{top}.\vec{R}z_{top} / \boldsymbol{SQRT}(\vec{R}s_{top}{}^2.\vec{R}z_{station}{}^2)$$

By comparing the cosines of the angles θ and θ^* it is determined whether the satellite is in the radio visibility zone of the ground station.

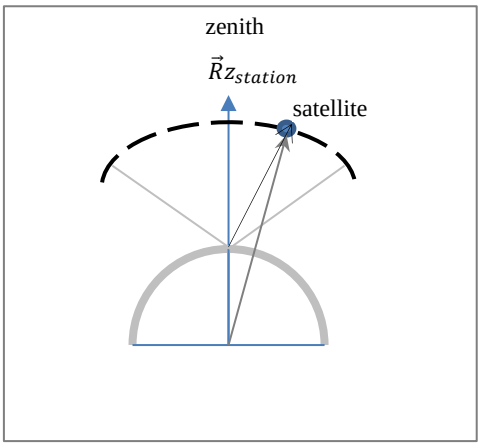


Fig. 1. Geometric model of the situational condition

Interpolation of satellite coordinates

To determine the beginning and end of the time intervals (t_b, t_e) in which the considered situational condition is fulfilled, interpolation of basic quantities included in the model presented above is used. At this stage, the Lagrange method [2] is applied. For a polynomial of n^{th} order:

1. $P_n(x) = \sum_{i=0}^{n} \frac{L(x)}{(x-x_i)L'(x_i)}$

where $L(x) = (x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_n)$ and $L'(x_i) = (x_i - x_0) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)$. For this purpose, the m last state vectors $\langle\langle \vec{p}(t - (m-1)\Delta t)_1, \vec{p}(t - (m-2)\Delta t)_2, \dots \vec{p}(t)_m \rangle$ of the satellites from one mission are stored. In this case, only the coordinates are used for interpolation, but in others, the velocities are also utilized. After each subsequent integration step of the equations of motion, the obtained values of the components of the state vector $\vec{p}(t)$ are stored as the last element of an array. The values of $L'(x_i)$ are constant and are calculated once at the beginning for all objects. The addresses of these values and the state vectors for the objects from each mission are passed to the situational conditions when creating their descriptors.

The situational condition model involves the geographical coordinates of the station, which, due to the Earth's rotation, are calculated for equidistant moments at which the satellite state vectors are integrated. Therefore, the station coordinates in a geo-equatorial coordinate system also need to be determined by interpolation for moments within a time step.

At the stage of creating the model of a satellite mission (or other main object, for example, space debris), the following structure is created:

```
type      Nodes_Lagrange
  integer    nodes,count_nodes
  integer    denominator_nodes_adr
  integer    t_nodes_adr,
  integer  xv_nodes_adr
end type  Nodes_Lagrange
```

The attributes of this structure are assigned values when the space mission model is created, and its address is written to the mission descriptor. Access to this descriptor is provided when creating situational task models. The address of the mentioned structure with the addresses of the state vectors of the objects, the Lagrange coefficients, and the number of interpolation nodes are taken from this descriptor and passed to the situation solver for solving situational problems. This is done at the creation stage of the mission model after the thread pool is created.

Algorithm and program implementation

PSAS is developed on the basis of the programming language Fortran. The situational condition with which it is checked whether a satellite is in the radio visibility zone of a ground communication station is implemented with the subroutine function **Sit__2**. The subroutine initially collects the necessary data to make it possible to determine the values of variables for moments of

time between the interpolation nodes by interpolation. When this is done, the situational condition is checked for the last moment of time by calling the subroutine function **Radio_zone**. This subroutine implements the situational condition model presented above. The value returned by **Radio_zone**, through the logical variable flag and other variables, is passed to the list of actual arguments of the subroutine **If_Flag_u**. The actual arguments also include the names of subroutines that are used depending on the result of checking the situational condition. The subroutine **If_Flag_u** is designed to be universal, for use in other situational conditions as well. When the situational condition is fulfilled for the first time at some point in time, the subroutine sub1 is called within the **b:IF(.NOT.begin_sit) THEN** construct. The variable sub1 is contextually interpreted as the name of a subroutine declared in **Sit__2** as **Radio_zone_be**. This subroutine is a combination of searching for the beginning and end of the searched interval. The value **.true.** of the first argument specifies the search mode for the beginning. Below, this subroutine is called again with the value .false. for the search mode for the end of the interval. The last argument **sub3**, in the list of the subroutine **sub1** (or **Radio_zone_be**), also contains the name of a subroutine - **Radio_zone**. The last subroutine is called within the **Radio_zone_be** subroutine. In the **Radio_zone_be** subroutine, the **Lagr_interp** subroutine is called to interpolate the geographical coordinates of the station, transformed into **GECS**, and the **Lagr_interp1** subroutine to interpolate the satellite coordinates. The differences in these subroutines are minimal – the first interpolates one value, and the second three. In the subroutine **Radio_zone_be**, an iterative process is performed in which checks are made of the situational condition in the middle of the interval. Depending on the result of the check, the interval is halved and the condition is checked with the subroutine **Radio_zone**. The process continues until the size of the interval reaches a value specified by **Tool**. The iterative process is fast enough and is terminated after about ten iterations.

The complex of subroutines for checking the considered situational condition is intended to function within the PSAS. To avoid problems in parallel calculations, local variables from different threads must be protected from mutual influence. This can happen when solving the same type of situational tasks from different threads simultaneously. This is avoided by declaring local variables as automatic.

Application of the proposed algorithms

To illustrate the proposed algorithms, we will consider the motion of a satellite with initial orbital parameters – semi-major axis $a = 7{,}200{,}000$ km, eccentricity $e = .001$ and inclination $i = 5°$. We will use the coordinates of the ground station ($\lambda = 10°, \varphi = 5°$) and the angle above the horizon $\theta = 10°$. The numerical integration of the satellite motion equation was performed with a step of 20 sec.

Table 1.

	Input time by interpolation [s]	Without interpolation		Output time by Interpolation [s]	Without interpolation	Duration [s]
4241.0	4259.4140	4261.0	4861.0	4867.9760	4881.0	608.562
10801.0	10805.3216	10821.0	11401.0	11420.4791	11421.0	615.157

Conclusion and future work

The proposed approach for accurately determining the start and end points of time intervals during which a specified situational condition is satisfied can be extended to other types of situational conditions. Research in this direction is ongoing, with the development of an alternative methodology currently underway. Furthermore, the Lagrange interpolation method employed in this study may be compared with other interpolation techniques to elucidate their respective advantages and limitations. In the present case, the interpolation time interval is constrained between the final two interpolation nodes - the penultimate and the last moment of time. Investigations into interpolation based on non-polynomial functions, as well as approximation methods, would also be beneficial, particularly in the context of advancing the multiphysics simulation environment for space mission analysis, within which the situational analysis tools are being developed.

The methodology proposed for the precise identification of the onset and termination of time intervals during which a given situational condition is satisfied can be generalized to accommodate other types of situational constraints. Ongoing research in this area includes the development of an alternative computational framework aimed at enhancing robustness and applicability. Additionally, the Lagrange interpolation technique utilized in the present study may be systematically compared with other interpolation schemes to assess their relative strengths and limitations in the context of

situational analysis. In this specific implementation, the interpolation interval is bounded by the final two interpolation nodes—namely, the penultimate and terminal epochs—serving as a constraint in the numerical procedure. Further exploration of interpolation strategies based on non-polynomial basis functions, as well as approximation techniques, would be of significant value, particularly in light of the continued development of a multiphysics simulation environment for space mission modeling, within which the situational analysis tools are being integrated.

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., Applying Parallel Situational Analysis Solver to Satellite–Space Debris Close Approach Problems. Algorithms and Subroutines. *Aerospace Research in Bulgaria*, v *37*, 2025, pp. 16–29
4. Кальницкий, Л.А., Добротин, Д.А., Жевержеев, В.Ф., and Сапогов, Н.А., Специальный курс высшей математики для втузов, 1976.

APPENDIX A

```
!*****************************************************************************************************************************
! Sit2: Determines whether the satellite is visible from a ground station with coordinates (lati_sta,long_sta) and
!                    (lat0,long0)
!          begin_sit- sit.cond. satisfaction beginning =>.true.  stored in t12(1)
!          begin_sit- sit.cond. satisfaction endind      =>.false. stored in t12(2)
!          dt_sit= t12(2) - t12(1); duration= dt_sit
!          begin_sit=.false => fl_rezults=.true. - the results are ready- for one step only!
!
!          address- where are stored <lati,long> coord
!.....*
FUNCTION        Sit__2(t,dt,object1_adr,nodes,nodes_count,node_t_adr,adr_znam_nodes,address, &
                       lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle,fl_rezults,duration,begin_sit,dt_sit,t12)
 USE  DFlib
 external                    Radio_zone_be
 logical            Sit__2,   fl_rezults,begin_sit
 integer             object1_adr,              node_t_adr,adr_znam_nodes,address
 real                lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,              duration
 real                lati_long(2,nodes),           t12*8(2,3)
 real*8                 t,dt,xv(6)
!_____________________________________________________
 type     sit_cond_2
  integer     object1_adr,node_t_adr,adr_znam_nodes,address
  real       lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle
 end type  sit_cond_2
 type     (sit_cond_2) cond_2,      cond_2_lenght(2)
  integer           cond_2_addr, cond_2_len
!_____________________________________________________
 logical     Radio_zone
 real        dt_sit
 real*8              object1_nodes(6,nodes),node_t(nodes),node_znam(nodes)
 real*8    Rz/6371.D3/,pi/3.141592654/,grrad
 logical     flag, flag1,flag2
AUTOMATIC

  POINTER(node_t_adr,node_t); POINTER(object1_adr,object1_nodes);
  POINTER(addressll,lati_long);  POINTER(address,icounter);
  POINTER(cond_2_addr,cond_2)
        cond_2_addr= address + 2*4*nodes+4+4; addressll= address + 8

  IF(icounter.LT.nodes) THEN
     icounter= icounter + 1;
         lati_long(1,icounter)= lati_sat;      Sit__2=.false.
         lati_long(2,icounter)= long_sat));  RETURN
     cond_2_len      = LOC(cond_2_lenght(2)) - LOC(cond_2_lenght(1));  RETURN
                           ELSE; addressll= address + 8
          lati_long(1,1:nodes-1)= lati_long(1,2:nodes)
          lati_long(1,   nodes   )= lati_sat
          lati_long(2,1:nodes-1)= lati_long(2,2:nodes)
```

```
          lati_long(2,   nodes   )= long_sat
     ENDIF

cond_2%adr_znam_nodes= adr_znam_nodes
cond_2%object1_adr      = object1_adr;      cond_2%node_t_adr= node_t_adr;
cond_2%lati_sat         = lati_sat;         cond_2%long_sat  = long_sat;
cond_2%lati_sta         = lati_sta;         cond_2%long_sta  = long_sta;
cond_2%angle            = angle;            cond_2%address   = address + 8

    flag= Radio_zone(node_t(nodes),dt,object1_nodes(:,nodes),lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle,0);

   CALL  If_Flag_u(Sit__2,flag,node_t(nodes),dt,fl_rezults,duration,begin_sit,dt_sit,t12, &
                           Radio_zone_be,Radio_zone,nodes,LOC(cond_2))

                    Sit__2= flag
END FUNCTION  Sit__2

FUNCTION          Radio_zone(t,dt,xv,lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle,kod)
  USE  DFlib
  logical         Radio_zone
  real                 lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle
  real*8          t,dt,xv(6)
!_____________________________________________________
  real*8     Rz_top(3),Rs_top(3),cos_tita
  real*8     r,r2,a,b,c,s1,q,l,sin_a,sin_b,cos_a,cos_b,Tita ! a/1.D0/
  real*8    Rz/6371.D3/,pi/3.141592654/,grrad
  logical    flag
!_____________________________________________________
   real*8          tq,TU,dtq,duration,omEarth/.729211575D-4/
   common    /c_time/tq,TU,dtq,duration
!_____________________________________________________
  AUTOMATIC   r,r2,c,s1,l,q,Tita,a,b,sin_a,sin_b,cos_a,cos_b,cos_c

     Rz_top(3)= Rz*COS(.5*pi - lati_sta)
     Rz_top(1)= Rz*SIN  (.5*pi - lati_sta)*COS(long_sta+TU*omEarth)
     Rz_top(2)= Rz*SIN  (.5*pi - lati_sta)*SIN (long_sta+TU*omEarth)
     Rs_top(1)= xv(1) - Rz_top(1); Rs_top(2)= xv(2) - Rz_top(2); Rs_top(3)= xv(3) - Rz_top(3)
    !Rs_top    = xv - Rz_top
     cos_tita   = (Rs_top(1)*Rz_top(1) + Rs_top(2)*Rz_top(2) + Rs_top(3)*Rz_top(3))/ &
          SQRT((Rs_top(1)**2 + Rs_top(2)**2 + Rs_top(3)**2)*(Rz_top(1)**2 + Rz_top(2)**2 + Rz_top(3)**2))
  IF(COS(angle).LE.cos_tita) THEN
                    flag=.true.
                      ELSE
                    flag=.false.
    ENDIF

           Radio_zone= flag
END FUNCTION  Radio_zone

!**************************************************************************
! <Radio_zone_begin>- Precizing in/out radio-zone moments
!
!            flag - .true. for 'in' & .false. for 'out'
!          mode - .true. for begin & .false. for end of time interval
!.....................................................................................*
SUBROUTINE         Radio_zone_be(mode,nodes,t_begin,adr_cond,Radio_zone)
  USE    DFlib
    logical              Radio_zone, mode
    integer                          adr_cond
    real*8                      t_begin
    real*8       object1_nodes(6,nodes),node_t(nodes),node_znam(nodes)
!_____________________________________________________
    type      sit_cond_2
     integer     object1_adr,node_t_adr,adr_znam_nodes,address
     real        lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle
    end type  sit_cond_2
    type     (sit_cond_2) cond_2
!_____________________________________________________
  logical   flag,log,flag1,flag2,flag3
```

```
 integer    object1_adr,adr_znam_nodes,node_t_adr
 real       lati_sat4,long_sat4
 real       lati_sat,long_sat,lati_sta,long_sta,angle,lati_long(2,nodes),latitude(nodes),longitude(nodes)
 real*8     lati_sat8,long_sat8
 real*8    Rz/6371.D3/,pi/3.141592654/,grrad
 real*8   dt,tool/.001/,td,tg,tm
 real*8   xv(6),t,tt
  POINTER(adr_cond,cond_2)
  POINTER(node_t_adr,node_t);             POINTER(adr_znam_nodes,node_znam)
  POINTER(object1_adr,object1_nodes); POINTER(address,lati_long)

      object1_adr     = cond_2%object1_adr;       node_t_adr = cond_2%node_t_adr;
   adr_znam_nodes= cond_2%adr_znam_nodes;
               lati_sat= cond_2%lati_sat;                long_sat = cond_2%long_sat;
               lati_sta= cond_2%lati_sta;                long_sta = cond_2%long_sta;
                  angle= cond_2%angle;                    address = cond_2%address

      td= node_t(nodes-1); tg= node_t(nodes);;
      dt= tg - td; tm= td + .5D0*dt

  latitude= lati_long(1,:);longitude= lati_long(2,:);

DO WHILE(dt.GE.Tool);
      log= Lagr_interp  (tm,nodes,node_t, latitude,    node_znam,   lati_sat8);   lati_sat4= lati_sat8
      log= Lagr_interp  (tm,nodes,node_t, longitude, node_znam,long_sat8); long_sat4= long_sat8;
      log= Lagr_interp1(tm,nodes,node_t, object1_nodes, node_znam,xv);
     flag= Radio_zone  (tm,dt,xv,     lati_sat4 ,     long_sat4 ,lati_sta,long_sta,angle,1);
  IF(flag) THEN;
       IF(mode) THEN; tg= tm;
                ELSE; td= tm
          ENDIF
            ELSE
       IF(mode) THEN; td= tm;
                ELSE; tg= tm
          ENDIF
    ENDIF
    tm= td + .5D0*(tg - td); dt= tg - td;
END DO

      t_begin= tm;

END SUBROUTINE  Radio_zone_be
!*************************************************************************************************
! <Lagr_interp>- one dimensional interpolation
!
!
!     Sx,Sy,Sz- x,y,z interpolated coordinates
!.....................................................................................*
logical FUNCTION  Lagr_interp (t,nodes,node_t,node_s,node_znam,xv)
  real*4                                                 node_s (nodes)
  real*8                                t,          node_t(nodes), node_znam(nodes)
  real*8                                                                                xv
  real*8                     rt
  real*8             numerator,Sx, coeff_Lagrange
  AUTOMATIC  numerator,Sx, coeff_Lagrange,rt

          Sx= 0.D0;  rt= t;
   DO  nd=1,nodes
        numerator = 1.D0;
       DO md=1,nodes
          IF(md.NE.nd) THEN;
             numerator = numerator *(rt - node_t(md))
            ENDIF
       END DO;
    coeff_Lagrange= numerator *node_znam(nd);
                 Sx= Sx + node_s(nd)*coeff_Lagrange
  END DO;        xv= Sx;

                       Lagr_interp =.true.
```

```
END FUNCTION      Lagr_interp

!*****************************************************************************************
! <If_Flag_u>- for all sit conditions with precizing begin and final times
!.....................................................................................*
SUBROUTINE      If_Flag_u(Sit__cod,flag,t,dt,fl_rezults,duration,begin_sit,dt_sit,t12, &
                                                sub1,sub3,nodes,adr_cond)
 USE  DFlib
   logical                      Sit__cod,  flag,     fl_rezults,         begin_sit
   integer                        adr_cond
   real                                    duration,               t12*8(2,3)
   real*8                       t,dt,H
!_____________________________________________________________________________________
  real*8             t_begin,t_final

a:IF(flag) THEN
  b:IF(.NOT.begin_sit) THEN ! Nachalo za situacijata- promjana na 'begin_sit' kam 'true'
        CALL  sub1(.true.,nodes,t_begin,adr_cond,sub3)
              begin_sit  =.true.;   ! fl_rezults=.false.
                    t12(1,1)= t_begin  ! Remembering the start time
                      dt_sit  =.0; fl_rezults=.false.
                        ELSE ! Inside the situational interval
                    t12(2,1)= t            ! Remembering time with a fulfilled condition
      ENDIF b
          dt_sit= dt_sit + dt
       Sit__cod=.true.
           ELSE ! The condition isn't meet
      c:IF(begin_sit) THEN      ! So far, there has been a situation
            CALL  sub1(.false.,nodes,t_final,adr_cond,sub3)
                    t12(2,1)= t_final   ! Remembering the end time
                    duration= dt_sit-dt; fl_rezults=.true.;!stop
                       dt_sit=.0; begin_sit=.false.
                ELSE
                     duration=.0;
          ENDIF c
         Sit__cod=.false.
    ENDIF a

END SUBROUTINE  If_Flag_u
```

ABRUPT VARIATIONS OF THE RADIATION FIELD AROUND MARS, MEASURED BY THE LIULIN-MO INSTRUMENT

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 Sciencese
e-mail: bwfer@yandex.ru

Keywords: *Solar proton events (SPE), Numerical Simulation, Detector response*

Abstract: *This work investigates the most significant variations in cosmic ray fluxes measured by the Liulin-MO instrument. The observed variations are linked to period of enhanced solar activity, particularly to solar proton events. Using numerical simulations, a qualitative analysis of the composition of the detected solar proton events has been carried out, providing insight into their characteristics.*

РЕЗКИ ИЗМЕНЕНИЯ НА РАДИАЦИОННОТО ПОЛЕ ОКОЛО МАРС, ИЗМЕРЕНИ ОТ ПРИБОРА LIULIN-MO

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: *Слънчево протонни събития (СПС), Числено моделиране, Отклик на детектора*

Резюме: *Тази работа изследва най-значимите вариации в потока на космическите лъчи, измерен с инструмента Liulin-MO. Наблюдаваните вариации са свързани с период на повишена слънчева активност, по-специално със слънчеви протонни събития. Чрез числени симулации е извършен качествен анализ на състава на регистрираните слънчеви протонни събития, което предоставя по-добро разбиране за техните характеристики.*

Introduction

The radiation field in interplanetary space and in orbit around Mars is primarily formed by solar cosmic rays (SCRs) and galactic cosmic rays (GCRs). SCRs are sporadic and impulsive events resulting from solar flares and/or coronal mass ejections (CMEs) [Reames, 2013; Velinov et al., 2013]. SCRs occur much more frequently during the rising phase of the solar cycle.

ExoMars is a joint astrobiology program of the European Space Agency (ESA) and Roscosmos for the exploration of Mars. ExoMars-2016, part of the ExoMars program, consists of the Trace Gas Orbiter and a landing module known as Schiaparelli. The primary objectives of this mission are to search for evidence of methane and other traces of atmospheric gases that could be signatures of active biological or geological processes, as well as to test key technologies in preparation for ESA's future missions to Mars. The Trace Gas Orbiter and Schiaparelli were launched together on March 14, 2016, aboard a Proton rocket and traveled to Mars in a combined configuration. One of the scientific instruments aboard the Trace Gas Orbiter is FREND (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector) – a neutron detector designed to confirm the presence of hydrogen. Liulin-MO, a cosmic radiation dosimeter, is a separate module of FREND.

Figure 1 presents the measurement data obtained by Liulin-MO for the entire period of its operation. The measured cosmic-ray flux is shown as a function of time and detector energy channel, each channel representing the deposited energy of individual particles. One channel corresponds to an energy of 70 keV. In the figure, the solar proton events from October 2021, February 2022, and May 2024, which are the subject of our study, are clearly visible.

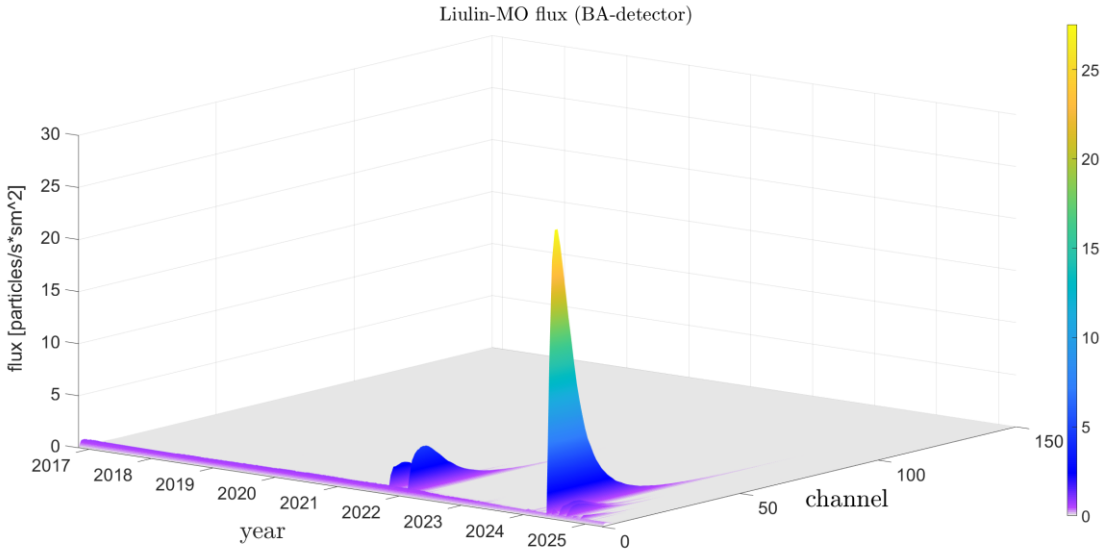


Fig. 1. The measurement data from the Liulin-MO instrument for the entire period of its operation (BA-single detector)

The temporal profiles of the three events are shown in Figure 2, illustrating the variations in the measured cosmic-ray flux over time. The three events exhibit distinct profiles, as shown in the figure. For example, the third event exhibits a decrease before the flux rises, a feature not present in the other two events.

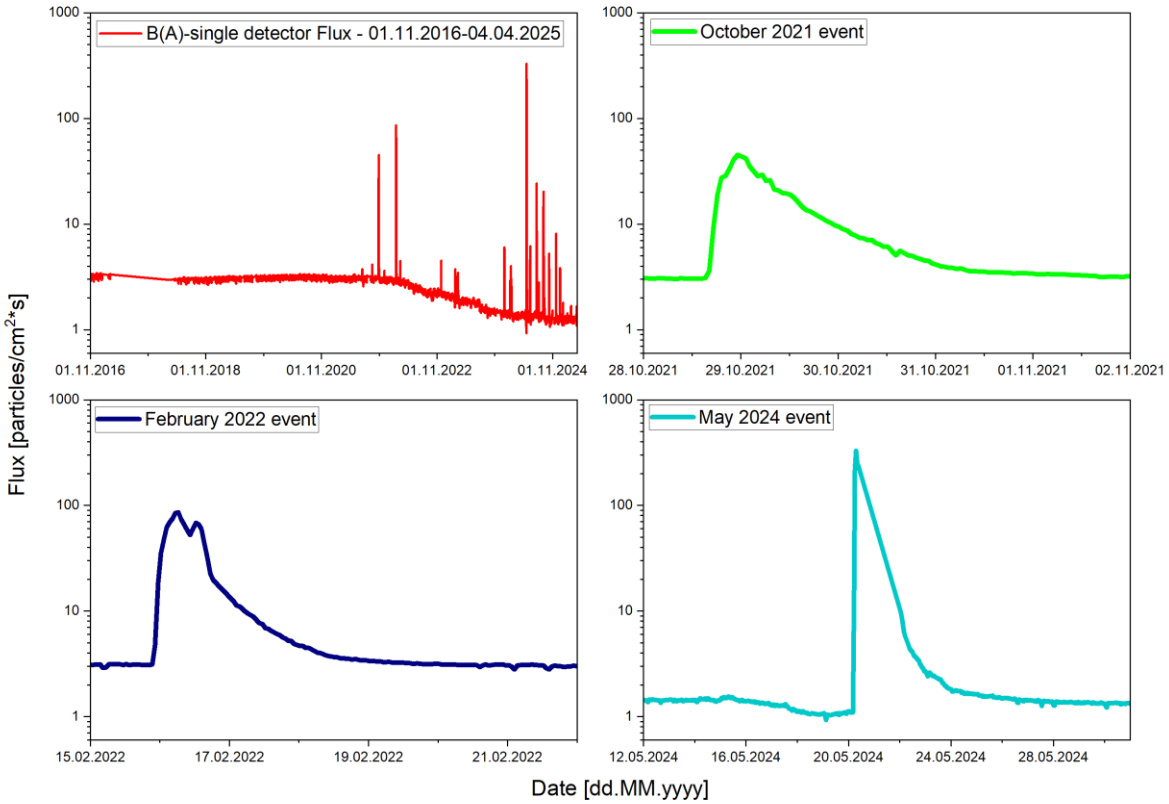


Fig. 2. Time dependence of the measured cosmic-ray flux

Methods

The methodology of the computer simulations follows that described in [Krastev et al., 2023a]. Figure 3 shows the geometric model of the Liulin-MO detector system, which is used in the simulations. This work presents simulations of the operation of the single BA detector, whose operating logic is presented in [Semkova et al, 2018].

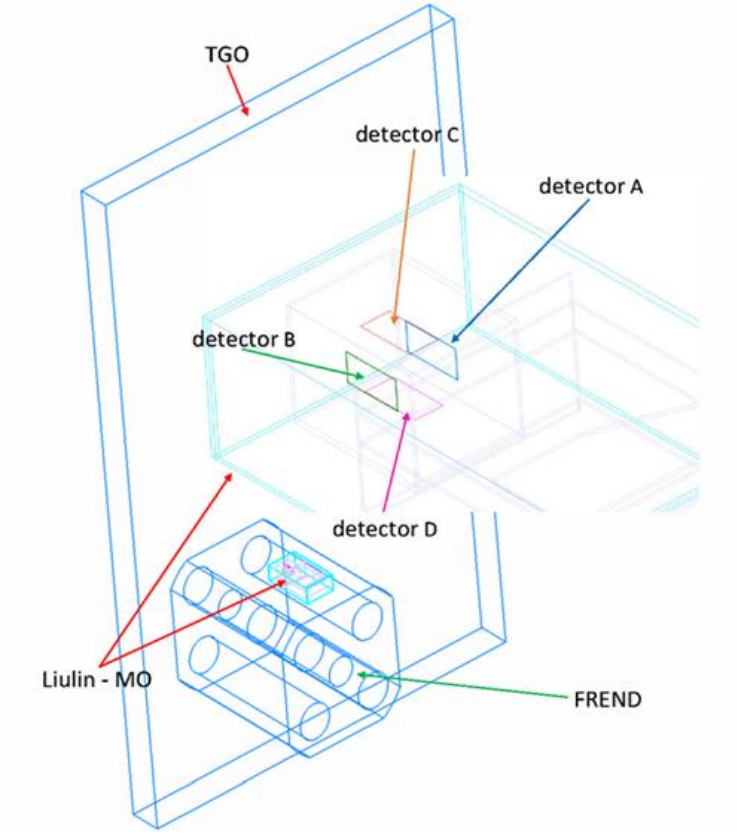


Fig. 3. Liulin-MO instrument detector system model

A series of simulations was performed to determine the response of the single BA detector to various types of particles with different energies. For the simulation, protons with energies ranging from 100 to 500 MeV and alpha particles with energies between 1 and 5 GeV were generated. For each proton energy, 9 billion particles were generated, while for each alpha-particle energy the corresponding number was 1 billion. The source of the generated particles is a sphere with a radius of 150 cm, with the center of the sphere coinciding with the center of the Liulin-MO detector system. The sphere also includes the entire TGO structure.

The response of the detector system can be described by the geometric factor. The definition of the geometric factor is given by [Zhao et al., 2013]:

(1) $$G = \frac{C}{J}$$

where C is the count rate of the detector [s^{-1}]. J is the differential flux of GCRs [$s^{-1}cm^{-2}sr^{-1}$]. For the simulated geometric factor, we have [Zhao et al., 2013]:

(2) $$G = \frac{n_0}{J},$$

Here, n_0 is the number of hits in the detector obtained from the simulation, and J is the simulated differential flux. For a cosine distribution and a spherical source, the number of generated particles N is given by:

(3) $$N = \iint J ds d\Omega = \pi \int J ds = 4\pi^2 R^2 J,$$

where the integration is performed over the entire surface of the source and the solid angle. Here, R is the radius of the sphere. By expressing J from equation (3) and substituting it into equation (2), we obtain:

(4) $$G = \frac{4\pi^2 R^2 n_0}{N}$$

Results

Figures 4 and 5 show the response of the single BA detector, obtained from simulation, to protons and alpha particles, respectively, at different energies.

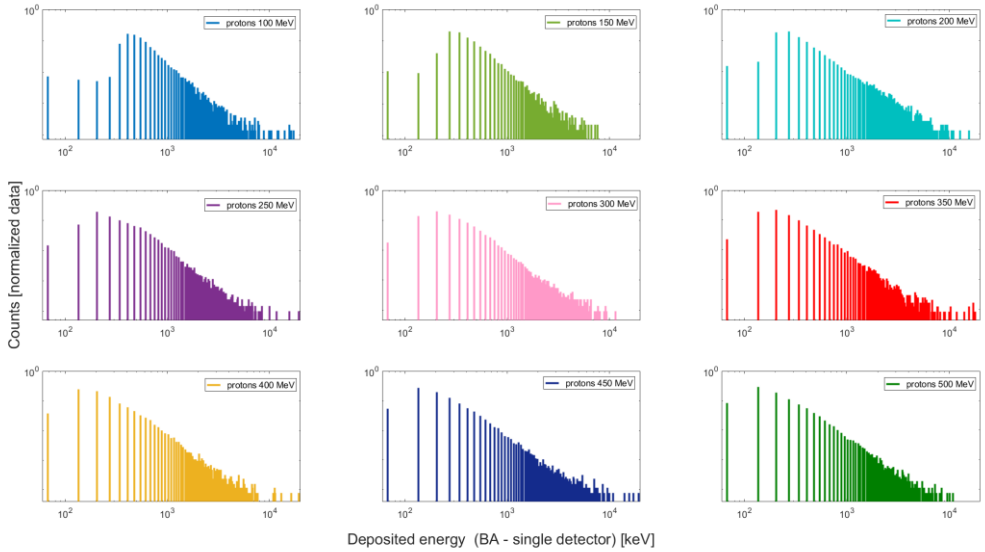


Fig. 4. The response of the single BA detector to protons at different energies

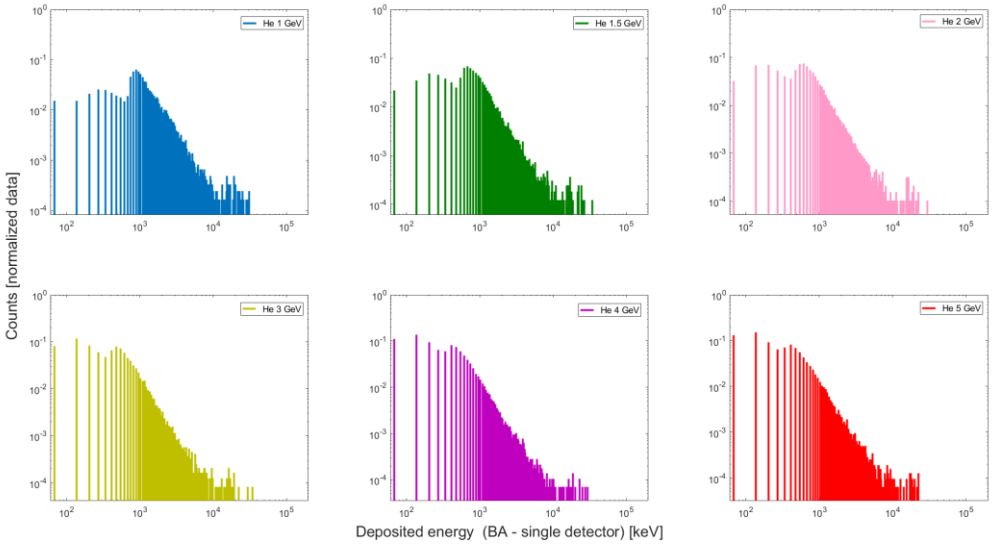


Fig. 5. The response of the single BA detector to alpha particles at different energies

The geometrical factor for alpha particles with different energies, calculated from the numerical simulation, is shown in Figure 6. The analytically calculated geometrical factor for a single detector is $4\pi\ cm^2 sr$. The higher values obtained from the numerical simulation can be explained by secondary electrons, which distort the detector's response.

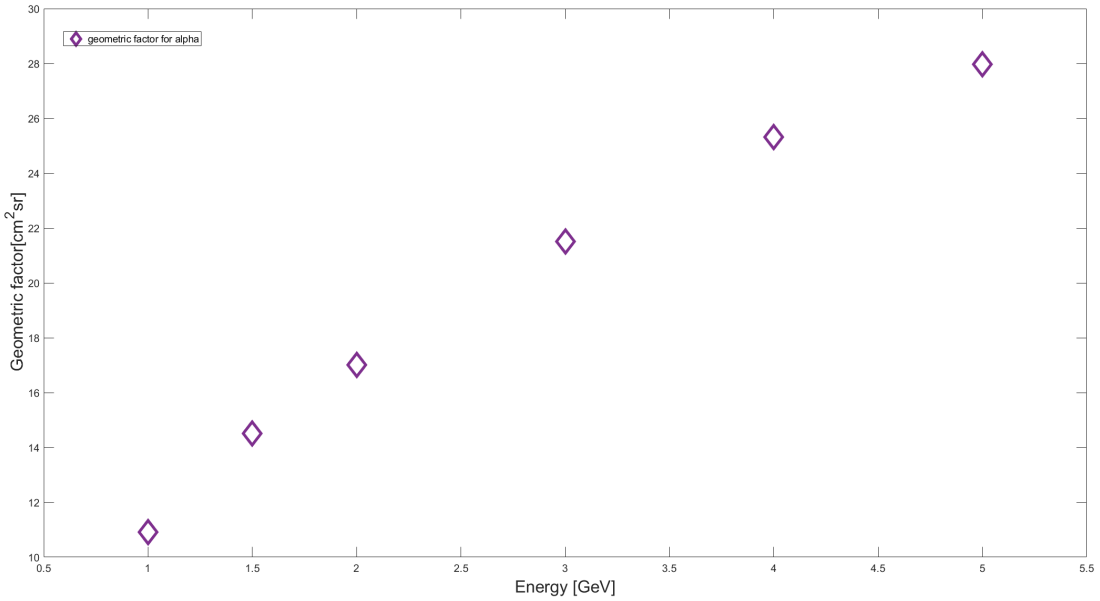


Fig. 6. The geometric factor for alpha particles calculated from numerical modeling

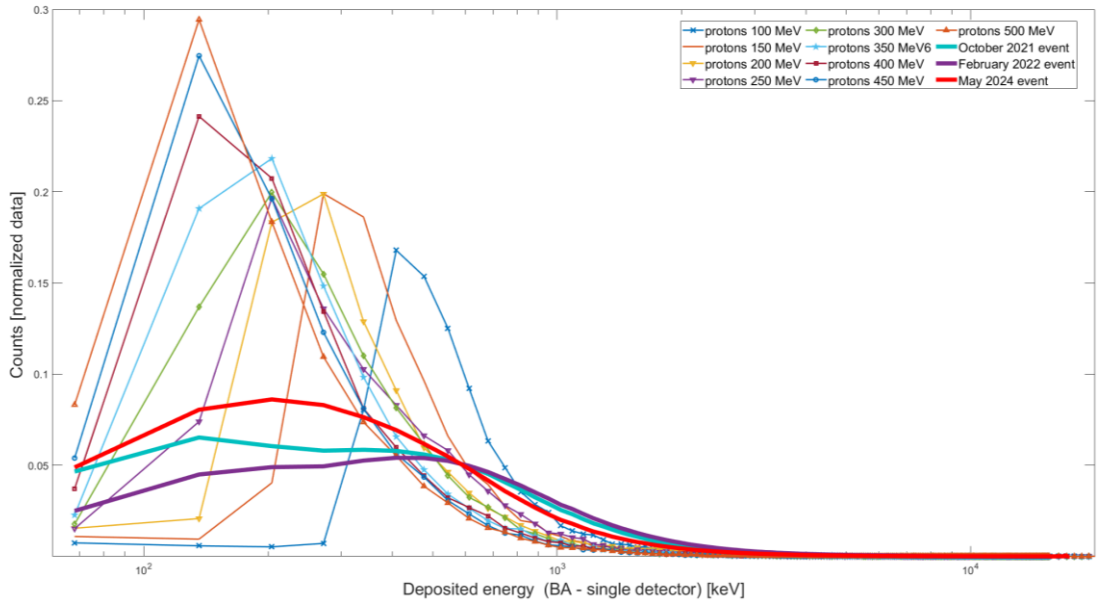


Fig. 7. Comparison between measured and simulated data

Figure 7 shows the measured values of the cosmic ray flux for the three events under consideration, as well as the detector's response to protons with different energies. The normalized values for the corresponding quantities have been used. From the figure, a rough idea of the composition of the individual events can be obtained. For instance, the May 2024 event is primarily produced by protons with energies in the range of 200–450 MeV. The February 2022 event is formed mainly by protons with energies between 50 and 100 MeV (the cutoff energy for the Liulin-MO design is 30 MeV), while the October 2021 event is produced mainly by protons with energies greater than 400 MeV.

Conclusion

The present work aims to demonstrate the capabilities of numerical modeling, without claiming absolute accuracy or completeness. Determining the component composition of solar proton events is not one of the scientific tasks of the Lyulin-MO instrument. The present work aims to reveal the additional functionalities possessed by the instrument.

References:

1. Krastev, K., J. Semkova, R. Koleva, V. Benghin, S. Drobyshev. “Numerical Simulation of the LIULIN-MO Device”, pp. 88–94, Proceedings of the 15th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” June, 2023, ISSN 2367-7570, pp. 88–94, https://spaceclimate.bas.bg/ws-sozopol/pdf/Proceedings2023.pdf
2. Reams, D., The Two Sources of Solar Energetic Particles. Space Sci Rev, 2013, 175, 53–92. https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9
3. Semkova, J., R. Koleva, V. Benghin, t. Dachev,Y. Matviichuk, B. Tomov, K. Krastev, S. Malchev, P. Dimitrov, i. Mitrofanov, a. Malahov, D. Golovin, M. Makrousov, A. Sanin, M. Litvak, A. Kozyrev, V. Tretyakov, S. Nikiforov, A. Vostrukhin, F, fedosov, N. Grebenikova, L. Zelenyi, V. Shurshakov, s. Drobyshev. “*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, 2018, Vol. 303, Pp. 53–66. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.12.034*
4. Velinov, P., S. Asenovski, K. Kudela, J. Lastovicka, L. Mateev., “Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth’s ionosphere and atmosphere.” J. Space Weath. Space Clim., 2013, 3, A14, 1–17.
5. Zhao, H., Y. Ma, H. Wang, H. Lu, X. Meng. “A Geometric Factor Calculation Method Based on the Isotropic Flux Assumption”, CP, 37, 126201, 2013.

THE USE OF ASTRONOMICAL DATA FOR SATELLITE TRACKING

Rositsa Miteva[1], Nikola Antonov[2,3], Adrian Sonka[4]

[1]Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Astronomical Observatory Meshtitsa, Institute for Advanced Physical Studies
[3]Faculty of Physics, Sofia University "St. Kliment Ohridski"
[4]Astronomical Institute of the Romanian Academy
e-mail: rmiteva@nao-rozhen.org

Keywords: *artificial satellites, astronomical observations, orbital parameters*

Abstract: *The study explored the usage of astronomical observations for the identification and tracking of artificial satellites. Spacecraft streaks on astronomical images are a growing issue for the astronomical community. The increasing number of satellites in the future will only worsen the situation for ground-based optical and radio observations of cosmic objects. In addition, the spacecraft passages often lead to the discarding of the obtained data. In this analysis, we propose an estimation of the usefulness of dedicated astronomical observation for spacecraft monitoring, identification, and deduction of orbital parameters. We use astronomical data from the Astronomical Observatory Mestitsa (Bulgaria) and the https://www.tycho-tracker.com/ software for the streak analysis. The results are compared with well-known satellite databases, such as https://celestrak.org/. The findings are discussed in the framework of space weather research.*

ОЦЕНКА ЗА ПРИНОСА НА АСТРОНОМИЧЕСКИ ДАННИ ПРИ ПРОСЛЕДЯВАНЕ НА СПЪТНИЦИ

Росица Митева[1], Никола Антонов[2,3], Адриан Сонка[4]

[1]Институт по астрономия с Национална астрономическа обсерватория – Българска академия на науките
[2]Астрономическа обсерватория Мещица, Институт за съвременни физически изследвания
[3]Фичически факултет, Софийски университет "Св. Климент охридски"
[4]Астрономически университе на Румънската академия
e-mail: rmiteva@nao-rozhen.org

Ключови думи: *изкуствени спътници, астрономически наблюдения, орбитални параметри*

Резюме: *Това изследване предлага оценка за приноса на астрономически наблюдения за идентификацията и проследяването на изкуствени спътници. Следите от спътници върху астрономически изображения са все по-чест проблем за астрономите. Увеличаващият се брой на спътници и в бъдеще само ще вложи настоящата ситуация за наземните оптични и радио наблюдения на космически обекти. В този анализ ние предлагаме оценка на ползата от специализирани астрономически наблюдения за проследяването на спътници, тяхното разпознаване и определяне на орбитални параметри. За целта използваме астрономически данни от Астрономическа обсерватория Мещица (България) и софтуера https://www.tycho-tracker.com/ за идинтифициране на следите от спътници. Резултатите са сравнени с данни от добре известни спътникови бази-данни като https://celestrak.org/. Обсъдено е и приложението им към тематиката на космическото време.*

Introduction

The accurate and uninterrupted satellite monitoring has widespread technological and practical applications in everyday life. The satellite industry continues to grow with an immense number of small-scale commercial satellites, mostly in low Earth orbit (LEO), e.g., the Starlink constellation, providing internet connection worldwide.

Apart from the natural orbital decay or/and collisions, satellites are subject to the changes in their plasma environment, both in the interplanetary (IP) medium and in the terrestrial magnetosphere or atmosphere, depending on the orbit. These changes are driven mostly by the variability of the Sun, e.g., increased photon emission, particle and plasma eruptions, transported via the solar wind through the IP space and the environment around the planet. These solar-driven drivers can lead to detectable effects in the ground-based or space-borne technological devices and pose a threat to human health/life. This is the concept of space weather (Temmer, 2021).

Isolated cases of spacecraft malfunctions, up to and including spacecraft loss, have been reported in the literature, e.g., a short summary can be found in Miteva et al. (2023). Among the most probable reasons are increased flux of solar radiation, energetic particles, and geomagnetic storms (GSs), the latter being the decrease in the ground-based magnetic field as a response to a magnetized plasma bubble hitting the terrestrial magnetosphere. One way to denote the strength of the GS is by the so-called disturbance storm index (Dst), measured in negative nanoTesla (https://isgi.unistra.fr/indices_dst.php).

A recent example of the GS effects on spacecraft orbital decay was demonstrated by Wu et al. (2025). The authors calculated the orbital decay by up to several hundred meters during the course of several GSs. Thus, one could explore the GS effects on spacecraft orbital parameters by preselecting periods of an ongoing GS.

Instead of using standard sources for satellite positioning, a different approach is proposed in this study, in terms of searching for an alternative source of satellite observations. During long exposure observations of the sky, satellites leave a track while passing in the field-of-view (FOV) of telescopes. Satellite streaks/trails on astronomical images in the optical (Kruk et al. 2023) and also in the radio (Di Vruno et al. 2023) domains are nowadays recognized as a serious problem for astronomy. Most commonly, such observations are regarded as compromised and are often discarded.

Alternatively, one might focus on the streaks instead, as the added value of dedicated astronomical observations has not been considered or evaluated in full, especially under the framework of satellite monitoring campaigns. This is why, in this study, the spacecraft streaks in the FOV of astronomical images are used (1) for satellite identification and (2) to deduce the payload/debris flight parameters. This study evaluates what amount of complementary information for spacecraft monitoring could be provided by a single, ground-based observing station, as in the case of Astronomical Observatory (AO) Meshtitsa in Bulgaria (Antonov, 2025).

Event selection

In order to evaluate the usefulness of astronomy-dedicated observations, we scanned the entire database of an AO Meshtitsa in Bulgaria, https://astro.iaps.institute/. The AO is operational from late 2023. The observatory is entirely remote and aims at observing selected FOVs on the sky, when weather permitting. For this study, we browsed through all collected observations over the entire year 2024. A dedicated software was written to automatically preselect all images where satellite streaks are present. The routine returned the following results for the number of astronomical images with satellite passing per month during 2024, namely:

- Jan: 5
- Feb: 5
- Mar: 13
- Apr: 96
- May: 10
- Jun: 91
- Jul: 170
- Aug: 97
- Sep: 58
- Oct: 28
- Nov: 9
- Dec: 11

leading to 593 individual images in total. The number of streak observations varies due to, e.g., weather conditions/seasons, pre-selected FOV with targets of observations, and duration of observations.

In the next phase of the analyses, the geomagnetic disturbances in 2024 were collected, using the Kyoto-database:

- provisional Dst index, https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html.

Among all disturbances, we filter out the following 12 strong GSs with Dst < −100 nT, listed below per month during 2024:

- Mar: 3rd, 20 UT, −112 nT; 24th, 21 UT, −128 nT
- **Apr: 19th, 20 UT, −117 nT**
- May: 11th, 3 UT, −406 nT
- Jun: 28th, 13 UT, −107 UT
- **Aug: 4th, 18 UT, −100 UT; 12th, 17 UT, −188 nT**
- **Sep: 12th, 15 UT, −121 nT**; 17th, 6 UT, −120 nT
- Oct: 8th, 8 UT, −148 nT; 11th, 2 UT, −333 nT
- **Nov: 9th, 13 UT, −101 nT**

where the five dates denoted in bold font contain also observed satellite streaks in the considered here astronomical data, or 18 individual images in total. As the GS lasts for many hours, even if the peak of the storm is recorded during local daytime and the astronomical observations are done during local nighttime, we will keep the case for further investigation.

In summary, routine astronomical observations from AO-Mestitsa coincided with strong GSs in 5 out of 12 cases. Also, only 18 out of all 593 FITS files with automatically pre-identified satellite streaks were recorded from a single location during strong GSs over the year 2024.

Methodology

As stated above, the goal of this study is to explore the possible effects on the satellite trajectories due to space weather events, especially during the course of a GS. As a demonstration of the analyses, we selected the case observed during the strongest GS in the list, namely 2024-08-12. The monthly values of the Dst index (provisional) are shown in Fig. 1 with 1-hr resolution. The minimum Dst value of −188 nT is recorded at 17 UT. The GS shows a double dip profile, with the first minimum of −139 nT at 8 UT.

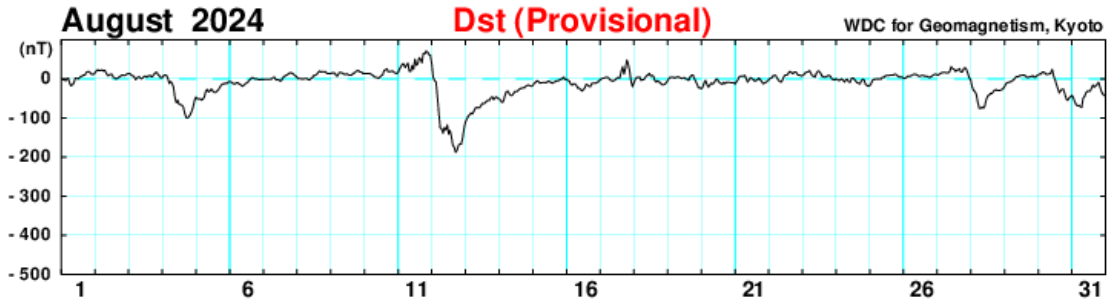


Fig. 1. Monthly trend of the Dst index with 1-hr resolution adopted from https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202408/index.html

Using a dedicated software, https://www.tycho-tracker.com/, we proceeded to analyze the data, focusing on the examples with a visible satellite track. The software loads the FITS file, and the FOV can be easily visualized, as shown in Fig. 2, focused on the Triangulum (Tri) constellation in this particular case. The initial and final points of the track are selected by hand and then supplied to the software, which returns a set of orbital parameters, including the satellite identification.

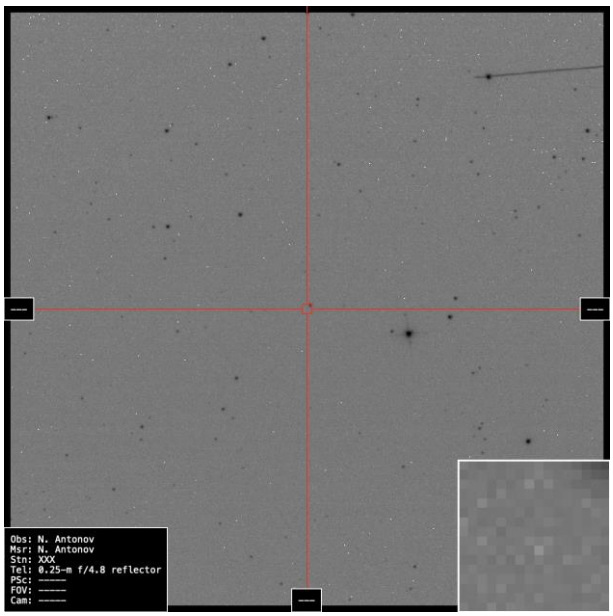


Fig. 2. An example of an astronomical image from AO-Mestitsa with a satellite streak in the top right quadrant during the GS of 2024-08-12

The next phase of the analysis is to compare the Tycho Tracker findings with the available information from independent satellite databases, among which we use the following:

- https://www.n2yo.com/
- https://celestrak.org/satcat

Results

For the example case of the track observed on 2024-08-12 (Fig. 2), the Tycho Tracker software provided the following results:

- object name: HJS-4A (HULIANWANG JISHU SHIYAN)
- object number: 58691U
- object speed (predicted speed of the matched object): 50610.82
- object distance (cross-track distance of the matched object, in arcminutes): 14.506

The type of this object is a payload. The object name and number are confirmed by the following databases. Firstly, the database https://www.n2yo.com/satellite/?s=58691#results confirms not only the satellite identity, but also provides the following additional information:

- NORAD ID: 58691
- International Code: 2023-212A
- Perigee: 1,110.5 km
- Apogee: 1,111.7 km
- Inclination: 50.0°
- Period: 107.3 minutes
- Semi-major axis: 7482 km
- Launch date: December 30, 2023
- Source: People's Republic of China (PRC)
- Launch site: Jiuquan Satellite Launch Center, China (JSC)

The second database is CelesTrak's satellite catalogue (SATCAT) search results: https://celestrak.org/satcat/table-satcat.php?CATNR=58691&PAYLOAD=1&ACTIVE=1&ORBIT=1&MAX=500. Namely, the trends of the orbital parameters during the entire month of August 2024 provided from https://celestrak.org/ are shown in Fig. 3. Among the plotted orbital parameters, only a slight increase of the eccentricity is observed at the time of the GS (2024-08-12), however such increases/decreases are no isolated feature and occur during quiet periods as well (e.g., during the period between 6th and 10th August, see Fig. 3).

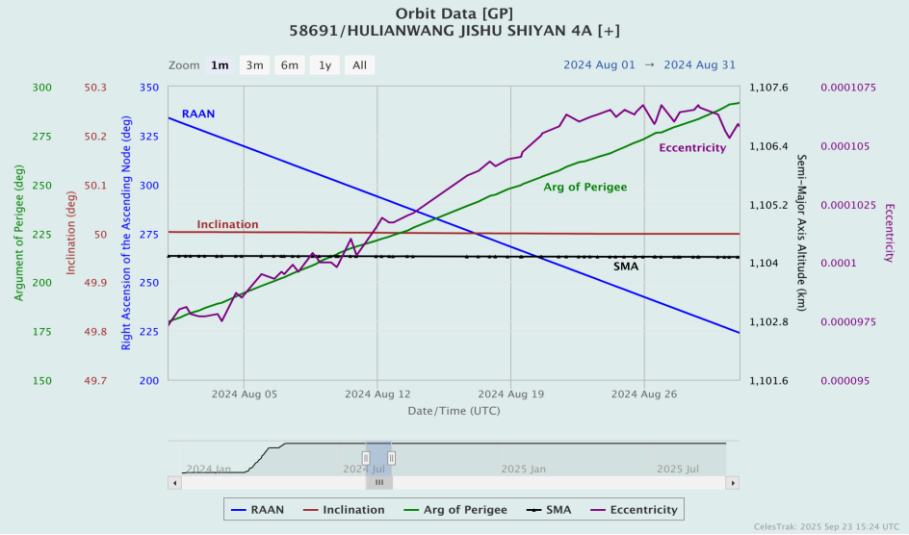


Fig. 3. Orbital parameters of HJS-4A during August 2024 adopted from https://celestrak.org/NORAD/elements/graph-orbit-data.php?CATNR=58691

In a similar way, we analysed the remaining events from the event list (18 in total). The results are listed below:

- In 7/18 cases, the satellite identification from multiple sources did not provide consistent results, leading to about 61% success rate of the procedure. All but one of the failed identifications are debris.
- In 8/18 cases, the software reported decay or debris, whereas the remaining are payloads (for civilian and military use).
- Detected changes in satellite orbital parameters during the course of the GSs: among the pre-selected parameters from https://celestrak.org/ (argument of perigee (deg), inclination (deg), right-ascension of the ascending mode (deg), semi-major axis altitude (km), and eccentricity) it is the eccentricity that exhibits changes, however a causality cannot be confirmed at this stage.

In order to test the sensitivity of the reported orbital parameters, we compared the timings of the sudden orbital drop of FENGYUN 3G satellite by Wu et al. (2025) during the GS on 2024-05-11 (with Dst = −406 nT at 3 UT) with the parameter trends from the above database. In addition to the variations of the eccentricity, it is the semi-major axis altitude (in km) that showed a gradual, but notable change from its overall trend (namely a drop-like decline) starting on the day of the GS. Compared with the results for the strongest GS from our list, it is plausible that changes in the orbital parameters from https://celestrak.org/ can be noticed during extreme storms only.

In the future, we will employ an alternative approach, namely the observed location of these satellites and compare them to the Two Line Element (TLE) positions from space-track.org in order to quantify changes in the orbital parameters due to (weaker) GSs. The quantitative determination of the variations of the satellite orbital parameters as a function of the GS strength, duration, profile, etc. is the ultimate goal of such studies and will be of practical use for the pre-determination of satellite stability conditions during space weather events.

Conclusions

Based on the data analyses over one year (2024), we confirm that, overall, there is limited usage of astronomy-dedicated data for spacecraft monitoring due to multiple factors: limited FOV and UT data coverage of a single ground-based astronomical observatory, weather conditions, and/or a very limited number of strong GSs during the ongoing solar cycle 25. In addition, there is a limited application of automatic routines to the data, apart from streak recognition. Also, there is a need for event post-analysis, which is often manual (satellite identification, object orbital parameters, and TLEs).

Nevertheless, astronomy-dedicated data have the potential to be useful (1) as a complementary and independent data source and (2) for historical event analyses, provided that data from a network of such ground-based stations is available. Single-point observations (by a given observatory) can cover a very limited fraction of all-sky satellite observations. A network of stations is needed with coordinated efforts triggered especially during a forecasted GS.

References:

1. Temmer, M. Space weather: the solar perspective: An update to Schwenn (2006), Living Reviews in Solar Physics, Volume 18, Issue 1, article id. 4, https://doi.org/10.1007/s41116-021-00030-3, 2021
2. Miteva, R., S. W. Samwel, S. Tkatchova. Space Weather Effects on Satellites, Astronomy, vol. 2, issue 3, pp. 165–179, https://doi.org/10.3390/astronomy2030012, 2023
3. Kruk, S. Garcia-Martin, P., Popescu, M. et al. The impact of satellite trails on Hubble Space Telescope observations, Nature Astronomy, 262-268, https://doi.org/10.1038/s41550-023-01903-3, 2023
4. Di Vruno, P., Winkel, B., Bassa, C. G. et al. Unintended electromagnetic radiation from Starlink satellites detected with LOFAR between 110 and 188 MHz, A&A, vol. 676, A75, https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346374, 2023
5. Wu, Y., Mao, D., Mao, T., Chen, Z., & Wang, J.-S. A space weather approach for quasi-real-time assessment of satellite orbital decay during geomagnetic storms based on two-line element sets, Space Weather, 23, e2024SW004289. https://doi.org/10.1029/2024SW004289, 2025
6. Antonov, N. Photometric Capabilities and Scientific Applications of the Meshtitsa Private Observatory, Bulgarian Astronomical Journal, vol. 44, 202.

A NETWORK FOR SOLAR OPTICAL OBSERVATIONS IN BULGARIA

Rositsa Miteva[1], Pencho Markishki[1], Werner Pötzi[2], Momchil Dechev[1], Dragomir Marchev[3], Samuil Petrov[3], Georgi Latev[1], Hristo Kirov[4], Kamen Kozarev[1]

[1]Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Institute of Physics, Kanzelhoehe Observatory for Solar and Environmental Research, University of Graz, Austria
[3]Astronomical Center "Konstantin Preslavsky" University of Shumen
[4]St. George International School and Preschool – Sofia, Bulgaria
e-mail: rmiteva@nao-rozhen.org

Keywords: *Sun, instrumentation, optical emissions*

Abstract: *The report presents a new initiative for the development of a network of ground-based stations for solar observations in the optical range. Three separate locations in Bulgaria have installed instrumentations for solar dedicated observations. The currently used telescopes (type, mounting, guiding systems) and designated filters (white-light, H-alpha) are described in detail. Test images are also included. Future plans for improvements are briefly discussed.*

МРЕЖА ЗА ОПТИЧНИ НАБЛЮДЕНИЯ НА СЛЪНЦЕТО ОТ БЪЛГАРИЯ

Росица Митева[1], Пенчо Маркишки[1], Вернер Пьотци[2], Момчил Дечев[1], Драгомир Марчев[3], Самуил Петров[3], Георги Латев[1], Христо Киров[4], Камен Козарев[1]

[1]Институт по астрономия с Национална астрономическа обсерватория – Българска академия на науките
[2]Институт по физика, Обсерватория Канцелхое, Университет Грац, Австрия
[3]Астрономически център към Шуменски университет "Епископ Константин Преславски"
[4]Международно училище "Св. Георги" – София, България
e-mail: rmiteva@nao-rozhen.org

Ключови думи: *Слънце, инструменти, оптически диапазон*

Резюме: *Статията представя нова инициатива за изграждане на мрежа от наземни наблюдателни станции за слънчеви наблюдения в оптичния диапазон. Три отделни локации в България имат инсталирана апаратура специално приспособена за слънчеви наблюдения. Използваните към момента телескопи (тип, монтировка, гидираща система) и филтри (бяла светлина и линията на H-alpha) са детайлно описани. Тестови изображения са също включени. Бъдещите планове за подобрения са накратко обсъдени.*

Introduction

Historically, the first telescope observations of the Sun, similarly to the other astronomical objects, were performed in the optical range. The observers are as follows, according to https://chandra.harvard.edu/edu/formal/icecore/The_Historical_Sunspot_Record.pdf:

- The very first solar observer is regarded to be Thomas Harriot (England) based on the notations and solar drawings in his journal dated 1610-12-08.
- In the following year, 1611, reports of sunspots were published in Germany by David and Johannes Fabricius, however no drawings were found.
- In 1612 Galileo Galilei (Italy), with his regular solar observations and drawings (https://galileo.library.rice.edu/sci/observations/sunspot_drawings.html), established the subject as an integral part of astronomy.

Contemporary solar monitoring relies on the data from numerous ground-based stations and spacecraft sensors. One notable ground-based station is Kanzelhöhe Solar Observatory – KSO (Austria, https://www.kso.ac.at/index_en.php) which will be used as an example for the development of the Bulgarian stations. Detailed information about the monitoring program and data products at KSO can be found in Pötzi et al. (2021). Among their data products are white-light and H-alpha (6563 Å) observations which will be also developed at the Bulgarian stations. Regular H-alpha observations are provided (as an additional science output) also by a Global Oscillation Network Group, https://gong.nso.edu/.

In order to avoid the night-time interruptions and weather conditions, one needs to invest in the development, launch and maintenance of space-borne observations. Satellites have been providing nearly uninterrupted streams of images, as long back as 1995 with the launch of the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) spacecraft orbiting around L1. An important recent addition to the solar-dedicated instrument fleet is the Solar Orbiter (launched in 2020) with the aim to reach as close as 0.284 AU and look above the ecliptic. A subset of solar images at various wavelengths are released daily at the well-known database for solar observations https://solarmonitor.org/.

White light (continuum) observations provide information mostly on the sunspots (i.e., areas of magnetic field concentrations emerging through the photosphere which appear dark due to decreased heat transfer, Solanki, 2003). The H-alpha line probes the solar chromosphere, where phenomena such as filaments/prominences, plages, flares, fibrils/spicules (and sunspots) are visible (Pötzi et al. 2021). Both wavelengths are complementary and the respective filters are aimed to be installed in the Bulgarian stations.

The construction of an observatory is a laborious task but should be regarded as an investment in the development of a know-how and human potential. In Bulgaria, we will use the available infrastructure at three separate locations (dome, telescope, internet connection, etc.) and build upon it. It is also advantageous to set up a well-targeted observer program with the option of rapid changes that are project or personnel dependent. Moreover, the development of an optical network will serve as a complementary monitoring program to the observation in different wavelengths, e.g. in the radio-domain. Currently, there are ongoing efforts for the building of a Bulgarian station of dual radio antenna field (https://lofar.bg/bg/), part of the European radio telescope, Low Frequency Array (LOFAR). A well-established optical solar network can be assembled as a trigger for the radio observations. This serves as an additional motivation for the development of various software tools, automatic pipe-lines and machine learning methods (e.g., Ramos et al. 2023). Moreover, the optical observatories can be a locus for pupil, student and young scientists educational and research programs, as well as outreach programs for the general public.

The aim of the presented initiative is to outline the available infrastructure housing the solar-dedicated instrumentation and filters as well as to showcase the first test results.

Instrumentation and Results

Below we present a brief description of each station, currently available instrumentation and test images. The diameter of the main mirror/lense (or aperture) is denoted with D and the focal length of the telescope - with f.

The first observing station of the network is the Astronomical Observatory (AO) – Belogradchik, located inside the city (elevation of about 522 m). Typical conditions for light pollution apply. Nevertheless, the observatory is used for regular night-time observations and recently also for solar observations. The telescope, rejection filter, H-alpha filter and first images were already described in Markishki et al. (2025). Here we present an improvement in the filter system, namely the Lunt H-alpha filter (mounted off-axis on a plate, in front of the telescope tube), see Fig. 1 (left). For completeness, the current instrumentation is outlined below:

- Telescope: Celestron C11 – Schmidt-Cassegrain – C11 Optical Tube Assembly, D = 279 mm, f = 2800 mm, focal ratio: f/10
- Mount/guiding: VX AVX GoTo equatorial mount with stable guiding system
- Filter: LUNT LS60F H-alpha (i.e., 60 mm diameter) with blocking filter B600d1
- Camera: Common Vision Spark Series, SP-12401M-USB8, pixel size is 3.45 × 3.45 μm (289.8 px/mm), sensor's active area is 14.19 × 10.38 mm, the maximum frame rate of 23.4 fps with 8-, 10-, or 12-bit monochrome output, and the maximum exposure time during operation is 1/23.4 s (0.042735 s).

A test image was taken on 11-07-2025 and shows a sunspot structure (Fig. 1, right). According to the solar monitoring database https://solarmonitor.org/index.php?date=20250711 this is active region (AR) 14136. However, a strong interference pattern is also present, compromising the overall quality. Due to the system limitation (off-axis location of the filter) there is the option of cropping the image around the center of the sensor.

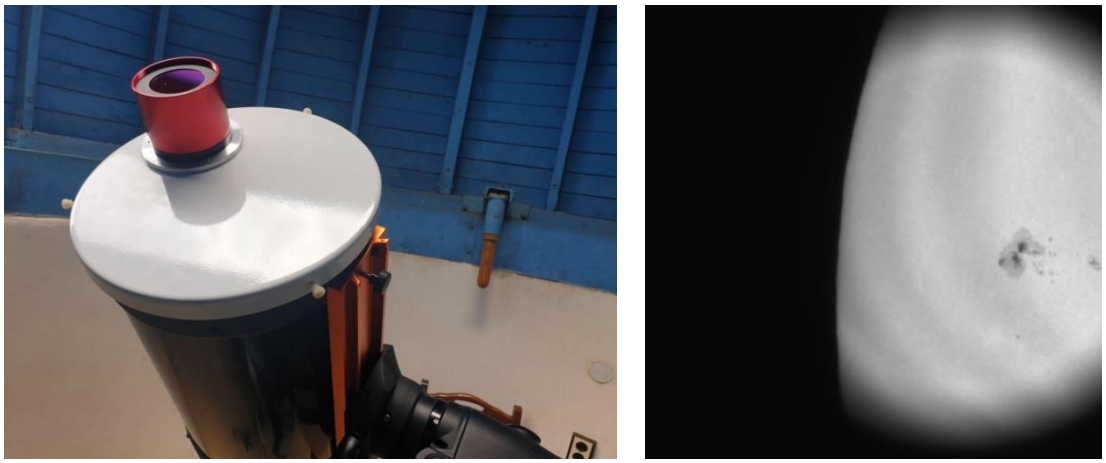


Fig. 1. Instrumentation and test image from AO-Belogradchik on 11-07-2025

The second station, Astronomical Center-Shumen University, is located on a plateau (at about 500 m elevation). The instrumentation used (Fig. 2, left) is as follows:

- Telescope: Coronado ST 40/400 PST Personal Solar Telescope OTA, D = 40 mm, focal ratio: f/10
- Mount/guiding: azimuthal, 'HelioFind' automatic Sun-guiding system
- Camera: NexImage 5 CCD camera
- Filter: integrated H-alpha

The test image shows a faint but clearly visible interference pattern, see Fig. 2 (right), with numerous sunspot groups (https://solarmonitor.org/index.php?date=20250923). The image was taken after a three-fold extension of the focal length to 1200 mm using a projection eyepiece.

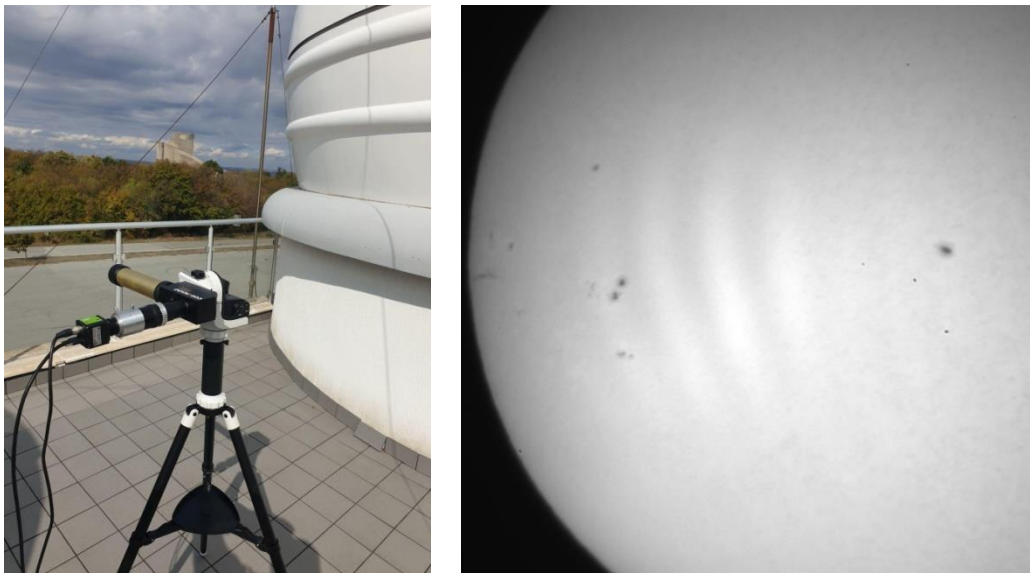


Fig. 2. Instrumentation at AO-Shumen and test image on 23-09-2025

The instrumentation to be used at the third station of the network, St. George RSP – Observatory (Fig.3, left), are described below:

- Guiding telescope: Refractor Celestron Omni XLT 120, D = 120 mm, f = 1000 mm, focal ratio: f/8.3
- Mount/guiding: 10Micron
- Camera: Atik Horizon Color CMOS Panasonic MN34230, chip size: 17.6 x 13.3 mm (22 mm diagonal), pixel size: 3.8 μm, pixel area: 4644 x 3506
- Filter: various metallized filters, glass and special film, i.e., AstroSolar Photo Film OD 5 from Baader

The performed tests show full-disk images, see an example in Fig. 3 (right) on 04-06-2025 (north is in the upper left side of the image). Several sunspot groups are visible at the western limb. According to the solar database https://solarmonitor.org/index.php?date=20250604 these are ARs 14100 (upper) and 14099 (lower).

Fig. 3. Instrumentation and test image from St.George school and preschool observatory on 04-06-2025

Outlook

The future development aiming for an operational network includes:

- improvement of the optical systems and filters, incl. purchasing of new telescopes, rejection/blocking (white-light) and H-alpha filters if needed at either location;
- development of data transfer between the observatories, data storage, automatic pipelines for image processing;
- development and release of a public online database for solar monitoring in Bulgaria.

Acknowledgments:

Selected results from this work have been obtained under the bilateral project "Joint Observations and Investigations of Solar Chromospheric and Coronal Activity" (https://astro.bas.bg/project-sun/) and supported by the Bulgarian National Science Foundation project No. KP-06-Austria/5 (14-08-2023) and Austria's Agency for Education and Internationalisation (OeAD) project No. BG 04/2023. DM acknowledges project RACIO supported by the Ministry of Education and Science of Bulgaria (Bulgarian National Roadmap for Research Infrastructure).

References:

1. Markishki, P., Dechev, M., Pötzi, W., Miteva, R., Kozarev, K. H-alpha Imaging of Solar Phenomena Using a Modified Schmidt-Cassegrain Telescope at Astronomical Observatory – Belogradchik, Bulgarian Astronomical Journal, Vol. 43, pp. 89–97 (2025)
2. Pötzi, W., Veronig, A., Jarolim, R., Rodríguez Gomez, J. M., Podlachikova, T., Baumgartner, D., Freislich, H., Strutzmann, H., Kanzelhöhe Observatory: Instruments, Data Processing and Data Products Solar Physics, Vol. 296, Issue 11, article id. 164 (2021)
3. Ramos, A. A., Cheung, M. C. M., Chifu, I., Gafeira, R. Machine learning in solar physics, Living Reviews in Solar Physics, Vol. 20, article number 4 (2023)
4. Solanki, S.K. Sunspots: An overview, The Astronomy and Astrophysics Review, Vol. 11, pp. 153–286 (2003).

ВРЕМЕТО – ОСНОВНО СЪСТОЯНИЕ ПРЕДИ ГЕНЕЗИСА

Красимира Янкова

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

Ключови думи: *термодинамика; релативизъм, космология*

Резюме: *Разгръщаме концепцията за Времето в качеството му на първично многообразие във водещите направления от съвременните теоретична физика и математика. Този нов начин на описание поставя Времето на основно ниво в термодинамика на пространство-време и разглежда произхождащите от него пространствено-времеви многообразия и под-многообразия като нови термодинамични състояния.*
Ще анализираме какво е поведението на главното многообразие в това състояние преди генезиса.

THE TIME – BAZIC PRE-GENESIS STATE

Krasimira Yankova

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

Keywords: *thermodynamics; relativism, cosmology*

Abstract: *We develop the concept of Time as a primary manifold in the leading directions of modern theoretical physics and mathematics. This new way of describing places Time at a fundamental level in the thermodynamics of space-time and considers the space-time manifolds and sub-manifolds originating from it as new thermodynamic states.*
We will analyse what the behaviour of the main manifold is in this state before genesis.

Въведение

В поредица от статии [2–7] въведохме нова космологична концепция. Тя предлага термодинамична интерпретация, която не налага космическа цезура, но предполага приоритетна посока в развитието на Вселената/ните.

В законите на физиката няма основание времето се движи само в едната посока и повечето процеси и взаимодействия са симетрични по отношение на обръщането на времето. Изключение правят само необратимите процеси. Те изискват време за релаксация до възстановяване на предишното състояние. Затова принципно са допустими и правите, и обратните явления, но те се различават по честотата, с която се случват. Термодинамиката се занимава с обратимите и необратими процеси, протичащи в следствие промяната на енергия – обменът, връзките и трансформацията и в други форми.

В същото време термодинамиката обединява концептуално квантовата и релативистката физика. Затова представлява удобна платформа върху която да се гради новата хипотеза.

Централна хипотеза

Както отбелязахме в [7] термодинамична интерпретация времето като основно ТД-състояние представлява многоизмерна активна среда със собствена енергия, която притежава нелокални свойства и спонтанна гъвкавост, и има дуална природа:

- Времето като минимално термодинамично състояние може да се разглежда като непрекъснат фон, а също;
- Времето като квантова среда от енергиини инфо-структури без причинно-следствена връзка, които могат да преминават свободно едни през други, без да предизвикват ТД-откат.

Такава недетерминирана среда няма памет за начални условия. Така е защото дадена инфо-структура при транслация се трансформира от другите с които контактува, а при ротация на място просто се копира върху себе си. Това вероятно е главната причина Времето (основното многообразие) да не притежава гравитация в чист вид.

За сметка на това Времето притежава адвекция и едноформите E_i^j на метриката (1) показват значещи ротационни степени на отместване между времевите компоненти, докато транслационните са занулени (2), показахме го подробно в [1].

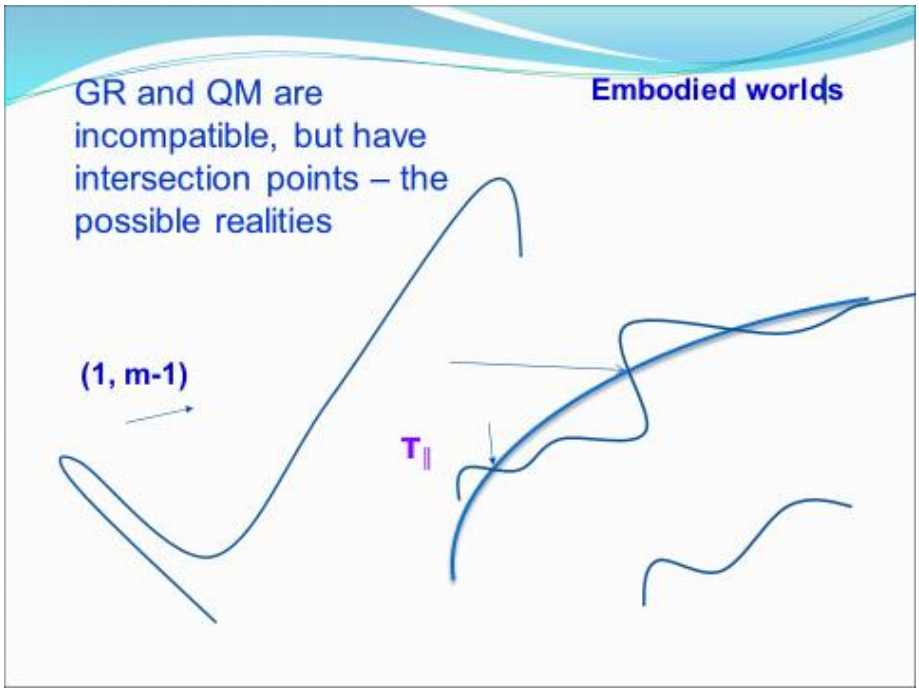
(1) $$g_{\mu\gamma} = E_\mu^a E_\gamma^b \eta_{ab}$$

(2) $$\left(\partial_{t_i} + v_{ij}\partial_{\chi_j}\right) v_{ji} = \left(\partial_{t_i} + v_{ij}[\nabla_x \equiv 0]\right) v_{ji} = \beta \partial_{t_i}$$

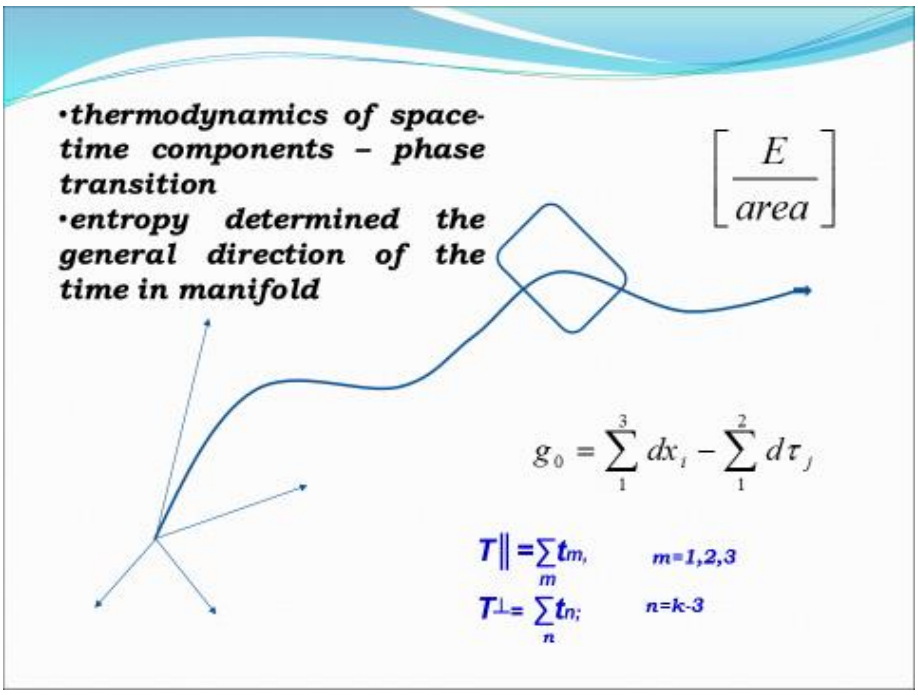
От друга страна отсъствието на пространствени структури във Времето на това си еволюционно ниво обяснява липсата на ентропия [6, 7].

Относителност и неопределеност

В основно състояние Времето лавира между реда и хаоса, без да е фино настроено. Системата се колебае между устойчиво и нестабилно състояние. Затова проявява самоорганизираща критичност. Само-отраженията създават локални смущения. Формират се инстантони и Времето преминава в ново състояние. Механизма се активира от неопределеността в собствената динамика на първичното многообразие (Фиг. 1).



Фиг. 1. Светове се формират, където свойствата на средата синхронизират дуалната си природа



Фиг. 2. Схема на спонтанното придвижване на локален мултиверс през измеренията

Новосформираните пространства вече могат да се движат свободно между времевите измерения (Фиг. 2), подобно и заедно със инфо-структурите от предишното състояние. Това издига същността в концепцията на релативистичната физика изцяло на фундаментално ниво. Няма отнапред зададени условности. Даден локален мултиверс може да се превключва към една или друга времева линия (крива - подредба от събития без причинно-следствена връзка), която може да се генерира или разпадне без последствия в главното многообразие. Освен това собствените времеви компоненти на мултиверса допълнително се само-съгласуват към нововъзникналата подредба, като създават алтернативна история. Глобално може да се обобщи, че времето ***никъде*** няма затворени криви. На практика ***никога*** не може да бъде достигнато собственото минало, а само съседно решение. Затова бъдещето е отворено.

Заключение

Тази статия е част от нашето теоретично изследване върху фундаменталната еволюция на Времето. Времето е двустранно отворена ТД-система (отгоре към безкрайност, а отдолу към неопределеност) и може да се саморегулира чрез преструктуриране по такъв начин, че ентропията да намалява. Следователно Времето подържа се скрит ресурс спонтанно да се отдалечава от равновесието си и да увеличава степените си на подреденост или сложност.

Ние разширихме полето на нашите проучвания и ще проследим възникването, потенциала и действието на възможните механизми за пренос свойствата на средата от една област от него в друга през процесите на неравновесната термодинамика. Това е стъпка в посока по адекватно описание на локално и глобално ниво.

Литература:

1. Yankova, Kr., 2018, Proceedings SES 2018, ISSN 1313-3888, 85–89
2. Yankova, Kr., 2019, Proceedings SES 2019, ISSN 1313-3888, 62–65
3. Yankova, Kr., 2020, Proceedings SES 2020, ISSN 1313-3888, 81–83
4. Yankova, Kr., 2021, Proceedings SES 2021, ISSN 1313-3888, 77–80
5. Yankova, Kr., 2022, Proceedings SES 2022, ISSN 1313-3888, 47–50
6. Yankova, Kr., 2023, Proceedings SES 2023, ISSN 1313-3888, 91–93
7. Yankova, Kr., 2024, Proceedings SES 2024, ISSN 1313-3888, 76–78.

SOME OBSERVATIONAL EFFECTS DURING SELECTED TIME-INTERVALS OF THE Z CAM STAR SY CNC

Denislav Rusev, Daniela Boneva, Krasimira Yankova

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

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

Abstract: *In our study, we present some observational effects during particular time-intervals of the Z Cam star SY Cnc. We use data from TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) and AAVSO (American Association of Variable Star Observers) international database, and we show some typical behaviors of this star. Fluctuations in brightness are detected in the light curves of SY Cnc, obtained from both astronomical facilities. The results show that the star passes through more active and less active states. Based on the observational data, we calculate the color indices and color temperature of the star during the outburst states. The radii of the primary and secondary components of the binary, and the orbital separation are also calculated. We apply our theoretical model to construct the effective temperature profiles in the accretion disc. After analysis of the SY Cnc parameters, we can confirm that with some exceptions the star is typical for the class of Z Cam stars.*

НЯКОИ НАБЛЮДАТЕЛНИ ЕФЕКТИ В ИЗБРАНИ ВРЕМЕВИ ИНТЕРВАЛИ НА Z CAM ЗВЕЗДАТА SY CNC

Денислав Русев, Даниела Бонева, Красимира Янкова

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

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

Резюме: *В нашето изследване представяме някои наблюдателни ефекти в определени времеви интервали на звездата SY Cnc (Cancer) от типа Z Cam. Използваме данни от международните бази данни TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) и AAVSO (American Association of Variable Star Observers), чрез които показваме някои типични поведения на тази звезда. В получените криви на блясъка от двата астрономически източника се детектират променливости в яркостта на SY Cnc. Резултатите показват наличие на по-активни и по-малко активни състояния, през които преминава звездата. На базата на данните от наблюденията, изчисляваме цветните индекси и цветната температура на звездата по време на състоянията с максимален блясък. Получените стойности показват преходи на обекта от по-студен към по-горещ и обратно.*

Пресметнати са радиусите на първичния и вторичния компонент на двойната система, както и орбиталното разстояние между тях. Приложен е теоретичен модел за конструиране на профилите на ефективните температури в акреционния диск. След анализ на параметрите на SY Cnc можем да потвърдим, че с някои изключения звездата е типична за класа на звездите от групата Z Cam.

Introduction

Cataclysmic variables (CVs) are known as binary stars in which the matter transfers from the main-sequence secondary component to the white dwarf primary through the Roche lobe overflow [23]. One important characteristics of all cataclysmic variables is the presence of a compact object, in this case a white dwarf star. Another important feature of these stars is that they undergo accretion processes which may cause eruptions.

According to their behavior CVs can be divided into four classes [23]: Novae; Recurrent Novae; Nova-like stars; Dwarf Novae.

Novae stars are binary stars which explode regularly. Novae stars are thought to be “new” stars but later it was realized that they are binary stars which erupt [5]. Recurrent novae are a much smaller class of cataclysmic variables. It is thought that there are only 10 in our Galaxy. This is the main difference from Novae stars. Another difference is that they erupt more rarely than the Novae stars [14]. Another sub-class of cataclysmic variable stars are nova-like stars. Their most outstanding characteristics is the lack of outbursts [11]. Dwarf Novae are another subclass of cataclysmic variables. They are divided into three subtypes: U Gem, Z Cam and SU Uma stars. U Gem stars do not show very regular outbursts which distinguishes them from Z Cam stars. The later show frequent outbursts followed by periods of standstills. During outbursts the magnitude changes from 2 to 6 [16]. We will analyze in detail one member of this subtype of stars - SY Cnc further in the text. The third type of Dwarf-novae is SU Uma stars. The long-lasting super-outbursts is the typical feature of this type of stars. They can last around two weeks and are followed by normal outbursts [22].

Z Cam stars are among the most active stars comparing to the other subclasses of dwarf novae. Only SU Uma stars are more active because of its outbursts and super-outbursts. It makes them interesting for investigation. One of the typical Z Cam star is SY Cancer (Cnc). It is a comparatively bright star with its maximum brightness of 11 magnitude [15] and in its minimum of 14 mag in V band [15]. An estimation of the orbital period gives ≈ 0.382 days [15]. The outburst period is 27 days [4]. SY Cnc passes through periods of outbursts and standstills. During outburst the star’s maximum magnitude is 11. Standstills’ time-periods are connected with lower magnitudes. The blackbody temperature of SY Cnc is estimated as ≈ 11000K [13]. The distance to the object is ≈ 405 pc [6]. An interesting feature of this object is the mass of the companion star, which is around the solar mass. It is untypical for the Z Cam stars [21]. The estimated values of masses are M_{1wd} = (0.42 ± 0.12) $M_\odot$ and M_2 = (0.23 ± 0.05) $M_\odot$ [21] and M_{1wd} = (0.65 – 1.31) $M_\odot$ and M_2 = (0.77 – 1.54) $M_\odot$ [4].

It is stated that the accretion disc that is formed around Z Cam stars is stable at certain temperatures and critical accretion rate $\dot{M}crit$. If the effective temperature of the disc is above 8000 K and below 6000 K the disc is in a stable state. If the accretion rate is below a certain amount, the star passes through periods of outbursts and standstills [10]. More accurately, if the accretion rate is above critical, there is a stable state of standstill. If the accretion rate is below critical, there are outbursts [6].

The observational data for SY Cnc, obtained both from TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) and AAVSO (American Association of Variable Star Observers), are reported in the next Section. Based on observations, we derive the color indices and color temperatures at maximum brightness, also some parameters of the binary system, as radius of the primary and secondary components, binary separation and the discs’ effective temperatures profiles are calculated in the last Section.

Observational data and results for SY Cnc

In this paper, we apply observational data obtained with different instruments and facilities, situated on board of TESS and AAVSO international database.

- **Observational data and results from TESS**

We use data from TESS observations, obtained from two sectors of the northern sky. The TESS main aim is to search for transiting Earth-sized exo-planets. Observations of bright stars, over 200 000 objects, are also provided [9]. The light curves of the studied objects by TESS photometric series could be analysed with a 2-minute cadence [8, 18].

The data of SY Cnc are obtained in the time-intervals: (2021-10-12 – 2021-11-05 Calendar dates, means yy-mm-dd), from the sector number 44, with an exposure time 120 sec and (2023-11-11 – 2023-12-07), from sector 72, with an exposure time 120 sec. The data were downloaded and reducing from the Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST, https://archive.stsci.edu).

The light curves for both time-intervals (Figs. 1a and 2a) were constructed as Flux-rate [e-/s] (electrons/second) vs. time in [days], from the Simple Aperture Photometry (SAP) Flux data.
Frequency analysis of the obtained data for the same time-intervals are represented as power-period diagrams (Figs. 1b and 2b). To determine the period, the Lomb-Scargle method is applied [12, 19].

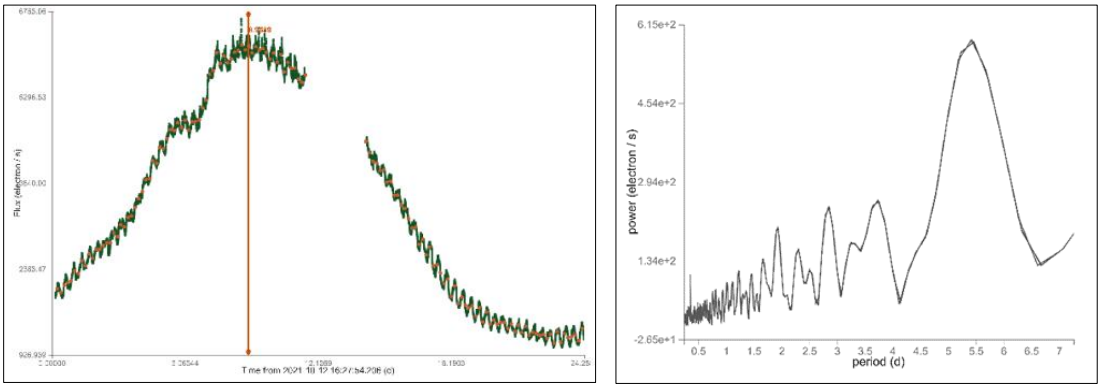


Fig.1. Light curve of SY Cnc, created with the data obtained from TESS for the observational interval 2459499.69 – 2459523.93 JD (a, left panel). The dotted red line denotes the binned curve with number of bins 200 for the optimal fit. The time of the peak in the flux variation is marked with a red vertical line. (b, Right panel): a power-period diagram of SY Cnc, obtained by the frequency analysis with data for the same observational time.

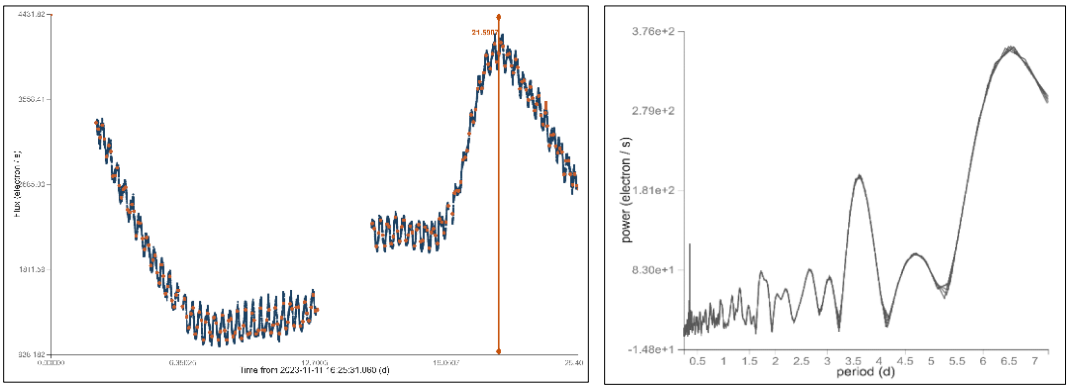


Fig. 2. Light curve of SY Cnc, created with the data obtained from TESS for the observational interval 2460259.68 – 2460285.085 JD (a, left panel). The time of the peak in the flux variation is marked with a red vertical line. The dotted red line denotes the binned curve with number of bins 150 for the optimal fit. (Right panel, b): a power-period diagram of SY Cnc, obtained by the frequency analysis data for the same observational time.

An increase in brightness is seen both in the flux vs. time curve and in the frequency analysis diagrams. The maximum values of the flux-rates of these light variations are (6.46 ± 0.003) $\times 10^3$ e/s with amplitudes of increasing of (2.25 ± 0.003) $\times 10^3$ e/s for the first time-interval.

During the second interval, the maximum observed flux-rates vs. time is estimated as (4.23 ± 0.002) $\times 10^3$ e/s, with amplitudes between minimum and maximum values of (3.09 ± 0.004) $\times 10^3$ e/s and the amplitude increased value is (2.05 ± 0.03) $\times 10^3$ e/s. This variation in brightness could be identified as a rapid burst activity. The appearance of small-scale oscillations is observed during the both observational time-intervals, with amplitudes of (0.21 – 0.38) ± 0.003 $\times 10^3$ e/s.

- **Observational data from AAVSO**

The observational data obtained for SY Cnc in BVRI bands cover two observational time-intervals. The first one is in the range: 2458800-2459000 JD (Julian dates) (2019-11-12 – 2020-05-30 Calendar dates). In the obtained data we see irregular variations of brightness in time and between the minimum (13.32 ± 0.022 mag in V band) and maximum (11.13 ± 0.026 mag in V band) values it is in the range 10 – 15 days in average, with periodicity of 25 – 30 days (see Fig. 3a). The second interval is in a range: 2458000 – 2458300 JD (2017-09-03 – 2018-06-30 Calendar dates). We observe an increase in brightness in two consecutive peaks with a period between them of ≈ 32 days, the magnitude in its second, higher maximum is 11.12 ± 0.018 in the V band (Fig. 3b).

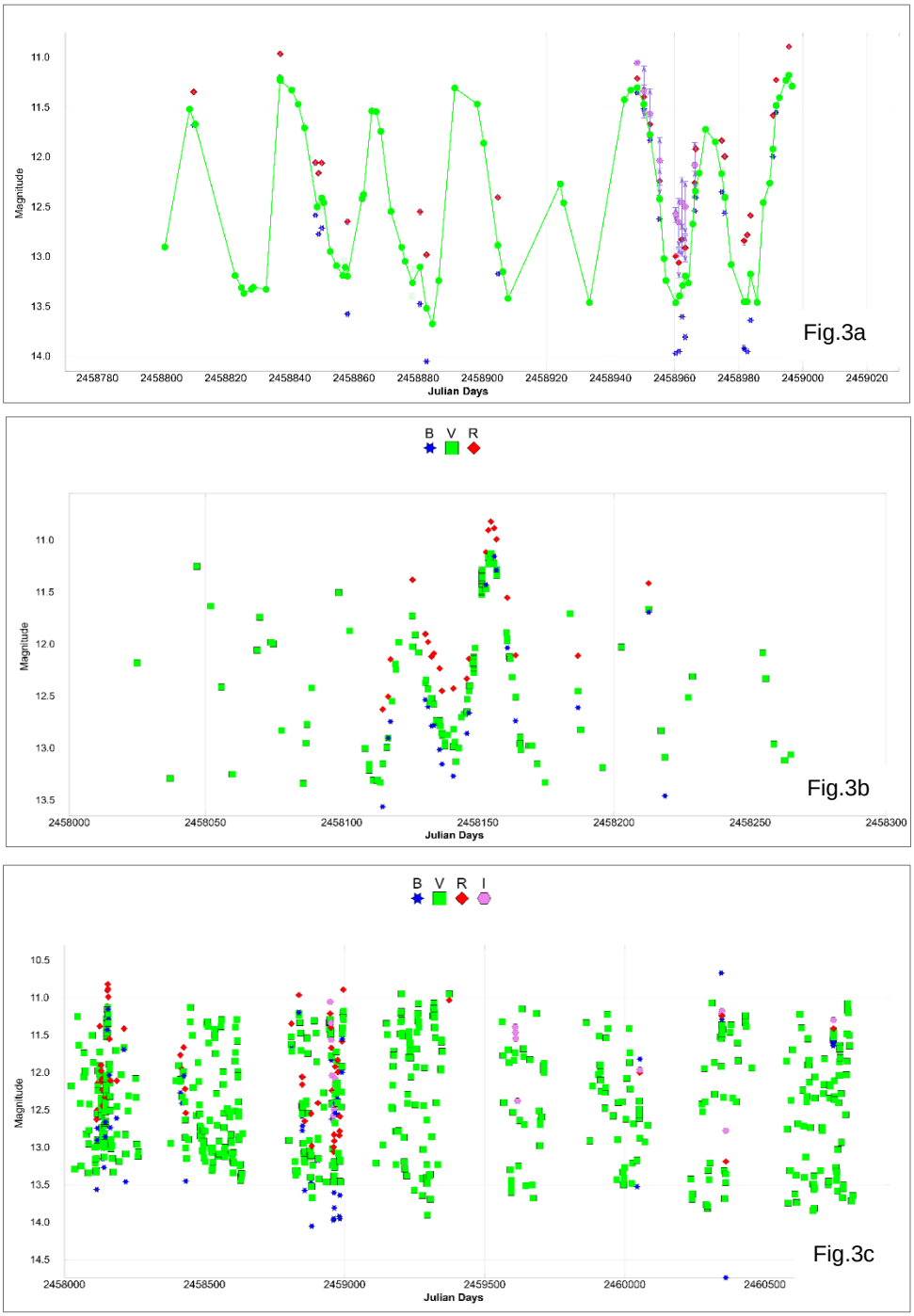


Fig. 3. Light curves of SY Cnc in BVRI bands for the intervals of time: 2019-11-12 – 2020-05-30 (3a) and 2017-09-03 to 2018-06-30 (3b) Calendar dates. Eight years interval of observations in BVRI bands (3c). The observational times in the figures are in JD (Julian dates). The data are taken from AAVSO.

We also present a light curve for a longer time-interval of observations (2458100–2460900 JD). The obtained observational data show the star's behavior stays in a similar way during the last ~ 8 years. Its brightness varies in the range of 13.61–11.02 magnitudes in V band, with amplitude variations of 2.0 – 2.5 mag (Fig. 3c). In contrast with other Z Cams object, like Z Cam and AT Cnc (see Boneva et al. 2024 [2], where the light curves of the two states are seen very clearly), we cannot distinguish prolonged states of standstill and outbursts for this longer time light curve of SY Cnc.

Parameters of the system and temperature profiles

- **Radii of the two components and binary separation**

In this section, we present our calculations of some system parameters of SY Cnc, as radii of the primary and secondary components and the distance between them.
To calculate the radius of the white dwarf primary R_1, the Eggleton's mass-radius relation is convenient to apply (eq. 1).

$$(1) \qquad \frac{R_1}{R_\odot} = 0.0114 \left[\left(\frac{M_1}{M_{Ch}}\right)^{-2/3} - \left(\frac{M_1}{M_{Ch}}\right)^{2/3} \right]^{1/2} \times \left[1 + 3.5 \left(\frac{M_1}{M_p}\right)^{-2/3} + \left(\frac{M_1}{M_p}\right)^{-1} \right]^{-2/3}$$

where $M_{Ch} = 1.4 M_\odot$ is the Chandrasekhar mass; $M_p = 0.00057\ M_\odot$ is a constant.

We use two different values of the primary white dwarf star mass M1 (see Introduction), as obtained by Smith et al. (2005) [21], noted here as $M_{1a} = 0.42\ M_\odot$ and the minimum value from Casares et al. 2009 [4], as $M_{1b} = 0.65\ M_\odot$, correspondingly.
Therefore, our calculations give two different values for the primary radius, R_{1a} and R_{1b}.

$R_{1a} = (1.02 \pm 0.002) \times 10^9$ cm $= 0.014 \pm 0.002\ R_\odot$ for M_{1a};
$R_{1b} = (7.95 \pm 0.004) \times 10^8$ cm $= 0.015 \pm 0.001\ R_\odot$ for M_{1b}.

To calculate the binary separation $\boldsymbol{a}$ the Kepler's 3rd law expression can be used (Eq. 2). We apply the same value for M_1 and for M_2 from [21], and again the minimum value from [4], noted here as $M_{2a} = 0.23\ M_\odot$ and $M_{2b} = 0.77\ M_\odot$.

$$(2) \qquad \boldsymbol{a} = \left(\frac{G(M_1+M_2)M_\odot P_{orb}^2}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Then, the obtained values for $\boldsymbol{a}$ are:

$a_1 = (1.31 \pm 0.01) \times 10^{11}$ cm $= 1.89 \pm 0.01\ R_\odot$
$a_2 = (1.71 \pm 0.02) \times 10^{11}$ cm $= 2.47 \pm 0.002\ R_\odot$

Further, to calculate the radius R_2 of the secondary component of the objects, the equation of Eggleton [7], which gives a high accuracy of the obtained values, is applicable.

$$(3) \qquad \frac{R_2}{a} = \frac{0.49 q^{\frac{2}{3}}}{0.6 q^{\frac{2}{3}} + ln\left(1 + q^{\frac{1}{3}}\right)}$$

Here $q = M_1/M_2$ is the mass ratio and in accordance with two values of M_1 and M_2, we have $q_1 = 1.82 \pm 0.002$; $q_2 = 0.84 \pm 0.002$. Then, for the radii R_{2a} and R_{2b} we obtain:

$R_{2a} = (2.97 \pm 0.03) \times 10^{10}$ cm $= 0.431 \pm 0.004\ R_\odot$
$R_{2b} = (2.50 \pm 0.02) \times 10^{10}$ cm $= 0.363 \pm 0.003\ R_\odot$

All the values of the calculated parameters are given in Table 1.

Table 1. System parameters of SY Cnc, calculated in this paper, as follows: R_1 – radius of the primary; R_2 –radius of the secondary; **a** – binary separation

Parameters /Object: SY Cnc / **Masses**	**Rwd (R_1) [$R_\odot$]**	**R_2 [$R_\odot$]**	**a [$R_\odot$]**
M1a; M2a	0.014 ± 0.002	0.431 ± 0.004	1.89 ± 0.01
M1b; M2b	0.015 ± 0.001	0.363 ± 0.003	2.47 ± 0.002

- **Color index and color temperature**

The observational data from AAVSO in BVRI filters allow us to estimate the color indices of SY Cnc. Following the data, we obtain the color indices (B - V) with values of the magnitudes in B and V filters at maximum brightness for the two time-intervals separately. During the first observational time-interval (see previous Section), the obtained index for the night of 2458837.03 JD has a negative value (B - V = - 0.035 ± 0.022), while on the night of 2458948.34 JD the color index is positive (B - V = 0.036 ± 0.016). This is an indication that during these two outbursts the object became bluer and hotter and then redder and cooler in a frame of ~ 4 months.

In the time-span of the second interval (Fig. 2b), during the outburst of the object the color varies from red to blue at its maximums in two nights. On the night of 2458154.80 JD the color index is positive (B - V = 0.027 ± 0.004) and on the night of 2458156.00 JD is already negative (B - V = - 0.066 ± 0.022).

Further, using the more precise derredened color index $(B - V)_0$, we could calculate the color temperature $T(B - V)_0$ of SY Cnc during the maximum brightness in both observational time-intervals. The formula of Ballesteros [1] is appropriate to apply here:

$$(4) \qquad (Tcol)_0 = 4600K \times \frac{1}{(0.92(B-V)_0+1.7)} + \frac{1}{(0.92(B-V)_0+0.62)},$$

According to Shara et al. 2012 [20], the color excess value of SY Cnc is E(B - V) = 0.0 [3]. Using this value and applying it on the expression $E(B - V) = (B - V) - (B - V)_0$, we obtain that $(B - V)_0 \approx (B - V) \pm 0.0001$. Then, our calculations give the next values for the color temperatures (also see Table 2):

$(Tcol)_{0_11}$ = 10584 ± 425 K; $(Tcol)_{0_12}$ = 9700 ± 382 K;
$(Tcol)_{0_21}$ = 9800 ± 470 K; $(Tcol)_{0_22}$ = 11030 ± 330 K.

This result confirms that during the second observational time-interval the object became hotter, which is a sign of active accretion processes.

Table 2. Color index and color temperatures of SY Cnc during the two observational time-intervals. Values are obtained at maximum brightness for the selected dates

Object/ Values	**Time-interval 2458800-2459000 JD**		**Time-interval 2458000 – 2458300 JD**	
SY Cnc	**$(B-V)_0$_max**	**$(Tcol)_0$_max [K]**	**$(B-V)_0$_max**	**$(Tcol)_0$_max [K]**
JD 2458837.03			**JD** 2458154.80	
- 0.035 ± 0.022		10585 ± 425	0.027 ± 0.004	9800 ± 470
JD 2458948.34			**JD** 2458156.00	
0.036 ± 0.016		9700 ± 380	- 0.066 ± 0.022	11030 ± 330

- **Temperature profiles**

Like other DN stars and as a member of Z Cams, an accretion disc around the white dwarf star is formed in the SY Cnc's binary configuration. The outbursts manifestation could be sometimes related to the disc's activity and temperature variations. In this section we use the next formula of Pringle [17] to show the development of the effective temperature (Teff) in the accretion discs of the object.

$$(5) \qquad T_{eff} = T_{wd}\left(\frac{R_{wd}}{r}\right)^{3/4}\left(1 - \left(\frac{R_{wd}}{r}\right)^{1/2}\right)^{1/4}$$

For this aim, we apply one-temperature model of an accretion disc. It is known that the disc develops an advection. In this case, a non-stationary and non-axisymmetric accretion flows are considered and advection stays in the non-dominant regime/mode. The model's results allow us to get 2D-structure of the disc [24]. Then the effective temperature in the terms of this solution is:

$$(6) \qquad T_{eff} = T_0\left(\frac{x}{R_d}\right)^{1/4}(f_1 f_4 x(4x)^3)^{1/4}$$

Here *x = r / Rd, Rd* - accretion disc radius, *f1(x)* - equatorial density and *f4(x)* – disc half-thickness correspondingly. Then, the profiles have the form:

$$T_{eff} \approx 5\left(\frac{10}{x}\right)^{2}\left(2.7\,(1-x)/x^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{4}}$$

The solutions are obtained for both a thin disc model and an advective model (Fig. 4a and Fig. 4b).

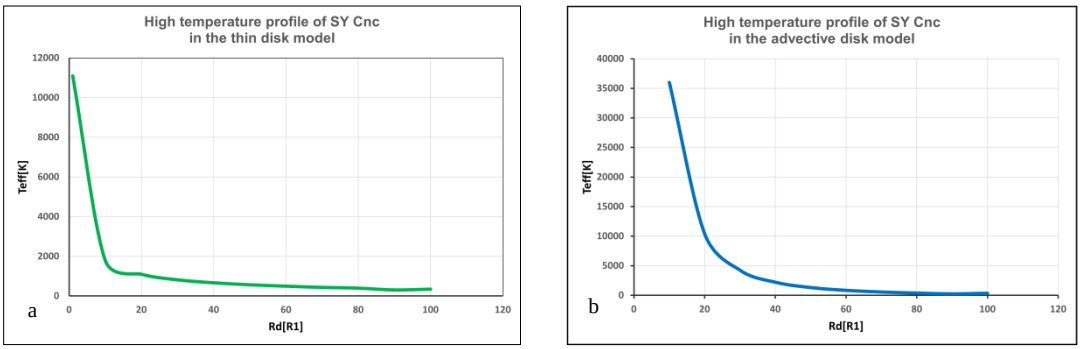


Fig. 4. The effective temperatures profiles of SY Cnc against the accretion disc's radius. Comparison of the two models' profiles is seen in 4(a) for the thin disc model and in 3(b) for the advective disc model.

Figures compare the changes of the disc temperature profile for the two models, for the surface temperature of the accretor of the SY Cnc. The effective temperatures are plotted against the discs' radii (Rd), where Rd is in a unit of white dwarf radius R_1. We used the averaged value of R_1 from our calculations in previous subsections (Table 1). The result demonstrates that the advective model much better represents the relationship between the disc's level of activity and the compactness degree of the accretor.

Conclusion

In this paper, we presented our study of the Z Cam star SY Cnc. We use observational data from two observational facilities, TESS and AAVSO. The resulting light curves and the power-period diagrams from TESS show the activity in the object during the observational time-intervals. In the obtained light curves of SY Cnc from AAVSO, brightness variations with larger amplitudes are seen.

Based on the observational data, we estimated the color indices and color temperatures at their maximum brightness and vary in the ranges: - 0.066 < $(B - V)_0$ < 0.036; 11030 [K] > $T(B - V)_0$ > 9700 [K]. According to the calculated values, during the two outbursts the object became bluer and hotter and then redder and cooler.

We calculated the radii of the primary and secondary components of SY Cnc, and the orbital separation between them. It is still under discussion, but because of its higher mass-ratio and the form of its temperature profile distribution with a higher color temperature, SY Cnc could have a sign of non-stable mass-transfer rate. We compared the parameters values of SY Cnc with two other Z Cam stars, Z Cam and AT Cnc, calculated in (Boneva et al. 2024, [1]). They have similar values of the parameters as masses, orbital periods and observational magnitudes.

We constructed the profiles of the effective temperature in the accretion discs of the object. From our analysis the known correlation is seen - the higher the temperature of the white dwarf, the smaller its radius. This confirms that the hotter object and its disc are definitely more active.

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 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.

References:

1. Ballesteros, F.J., New insights into black bodies, Europhys. Lett., 2012, 97, 34008
2. Boneva, D., K. Yankova, D. Rusev, Periods of outbursts and standstills and parameters variations in two Z Cam stars: Z Cam and AT Cnc., Astronomy, MDPI, 2024, 3, 208–219
3. Bruch, A, Engel, A, A catalogue of UBV colours of cataclysmic variables., A&AS, 1994, Vol. 104, p.79–88
4. Casares,J., I. G. Martínez-Pais, P. Rodríguez-Gil, SY Cnc, a case for unstable mass transfer?, MNRAS, 2009, Vol. 399, Issue 3, p. 1534–1538
5. Chomiuk, L., B. D. Metzger, K. J. Shen, New Insights into Classical Novae, ARA&A, 2021, Vol. 59:391-444
6. DR3-Gaia Collaboration, Vallenari, A., A.G.A. Brown et al, A&A, 2023, 674, A1
7. Eggleton, P.P., Approximations to the radii of Roche lobes, ApJ, 1983, vol. 268, p. 368, 369
8. 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
9. 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
10. Hameury, J.-M., J.-P. Lasota, Anomalous Z Cam stars: a response to mass transfer outbursts, A&A, 2014, 569, A48
11. Ladous, C., Nova-like variables, NASA, Washington, Cataclysmic Variables and Related Objects, 1993
12. Lomb, N.R., Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, ApSS, 1976, 39, pp. 447–462
13. Middleditch, J., F. Cordova, The colors of the pulsations and flickering of SY Cancri during outburst, ApJ, 1982, 255:585-595
14. Mukai, K., Recurrent Novae – a review, arXiv:1407.4526v1, 2014
15. Ohshima, T, Secular Variation in the Interval of Outbursts in Z Cam-type Dwarf Novae., Stars and Galaxies, 2022
16. Osaki, Y., Dwarf-nova Outbursts, PASP, 1996, 108 39
17. Pringle, J.E., Accretion discs in astrophysics, ARA&A., 1981, Volume 19 (A82-11551 02-90) Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., p. 137–162
18. Ricker, G.R., J.N. Winn, R. Vanderspek, et al., Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2015, 1, id. 014003
19. Scargle, J.D., Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, ApJ, 1982, 263, 853
20. Shara,M, T. Mizusawa, P. Wehinger et al, AT Cnc: a second dwarf nova with a classical nova shell, ApJ, 2012, 758 121
21. Smith, R.; O. Mehes.; D. Vande Putte; N. Hawkins, A non-main-sequence secondary in SY Cancri., MNRAS, 2005, 360, 364–374
22. Vogt, N, The SU Uma stars – an important sub-group of Dwarf Novae, A&A, 1980, vol. 88, no. 1-2, p. 66–76.
23. Warner, B., Transitions to and from Stable Discs in Cataclysmic Variable Stars., Astrophys. Space Sci., 1995, 230, 83–94
24. Yankova, Kr., Filipov, L., Structuring the hot advective accretion flow, as a result interaction of plasma with magnetic field, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014. http://adsabs.harvard.edu/abs/2014arXiv1408.4011Y

DETECTION AND REGISTRATION OF ORBITAL "SPACE JUNK" WITH OPTICAL INSTRUMENTS ON SMALL SPACE PLATFORMS

Alexey Stoev, Ognyan Ognyanov, Penka Stoeva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: stoev52@abv.bg, ognianov@acceco.com, penm@abv.bg

Keywords: *nanosatellite, optical observations, orbital parameters, space debris, optical instrument*

Abstract: *The launch of the first artificial satellite of the Earth in 1957 marked the beginning of the space age. At the same time, the appearance in the near space of a large number of objects of artificial origin that had exhausted their technological resource created a large number of non-working satellites and their small or large fragments. Thus, the extremely serious problem associated with the so-called space debris gradually appears. The number of these objects has increased significantly in recent years, especially in orbits up to about 2500 km. This makes their existence and the lack of technologies for their disposal an increasingly big problem for the international space community. Currently, space agencies of various countries are working on projects to search for, catalog and remove space debris from orbit. However, a significant part of such projects is aimed at searching for and removing from orbit large objects with dimensions larger than 10 cm. Objects below this size are much less studied, mainly due to the difficulties in observing such objects from the Earth's surface. One way to solve this problem is to develop space-based observation technologies using small optical devices deployed on nanosatellite platforms.*

Debris with sizes of about 10–1 cm can be effectively observed with optical instruments. The report presents the fundamental possibility of such registration, based on observations of debris in reflected sunlight. The possibility of determining the main orbital characteristics of debris, including from a single observing session, is also shown. The possibility of implementing an observational research program for space debris observations on board a specially designed nanosatellite is discussed. The characteristics of the scientific equipment are examined in detail, taking into account the dimensions and other limitations, as well as the capabilities of the equipment in terms of the distance to the observed objects, their size and physical characteristics.

ОТКРИВАНЕ И РЕГИСТРАЦИЯ НА ОРБИТАЛЕН „КОСМИЧЕСКИ БОКЛУК" С ОПТИЧЕСКИ ПРИБОРИ ВЪРХУ МАЛКИ КОСМИЧЕСКИ ПЛАТФОРМИ

Алексей Стоев, Огнян Огнянов, Пенка Стоева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: stoev52@abv.bg, ognianov@acceco.com, penm@abv.bg

Ключови думи: *наносателит, оптични наблюдения, орбитални параметри, космически боклук, оптичен прибор*

Резюме: *Изстрелването на първия изкуствен спътник на Земята през 1957 г. отбеляза началото на космическата епоха. Заедно с това, появата в близкия Космос на голям брой обекти от изкуствен произход, които са отработили своя технологичен ресурс създаде изобилие от неработещи спътници и техни малки или големи фрагменти. Така постепенно се появява изключително сериозния проблем, свързан с т. н. космически отпадъци. Броят на тези обекти се е увеличил значително през последните години, особено на орбити до около 2500 km. Това превръща тяхното съществуване и липсата на технологии за утилизация във все по-голям проблем за международната космическа общност. В момента космическите агенции на различни страни работят по проекти за търсене, каталогизиране и отстраняване на космически отпадъци от орбита. Значителна част от подобни проекти обаче са насочени към търсене и отстраняване от орбита на големи обекти с размери над 10 cm. Обектите под този размер са много по-слабо проучени, най-вече поради трудностите при наблюдението им от земната повърхност. Един от начините за решаване на този проблем е свързан с разработване на технологии за космически наблюдения с помощта на малки оптични устройства, разположени на наносателитни платформи.*

В доклада е представена фундаменталната възможност за ефективна регистрация на отломки с размери от 1 до 10 cm, базирана на наблюдения на отразената от тях слънчева светлина с оптични прибори. Показана е и възможността за определяне на основните орбитални характеристики на отломки, включително и от един наблюдателен сеанс. Обсъдена е възможността за прилагане на изследователска програма за наблюдения на космически отпадъци на борда на специално конструиран наносателит. Подробно са разгледани характеристиките на научното оборудване, съобразени с ограничените обеми, разстоянието до наблюдаваните обекти, техния размер и физически характеристики.

Introduction

A CubeSat is a small artificial satellite (nanosatel, picosatel), designed according to the "CubeSat Design Specification" standard. This standard defines several sizes of satellites, the smallest (and most commonly used) being designated 1U (from unit – "unit") and having the shape of a cube with an edge of 10 cm and a weight of 1.33 kg. The center of mass of the CubeSat must not deviate more than 2 cm from its geometric center for the 1U size. The standard and the multilateral cooperation program were created in 1999 by the California Polytechnic State University in cooperation with Stanford University with the aim of unifying and reducing the costs of launching small satellites into orbit (Fig.1a, b). Many universities and scientific institutes benefit from this, for whose limited budgets this is the only way to gain practical experience with real satellites and small instruments mounted on them [1]. The cost of constructing and launching one such satellite is in the range of $65,000 – $80,000. To date (2025) about 2,500 CubeSats have been manufactured and launched into space in the world. Most of them are 3U - 4U in size [2], [3]. There are no generally accepted specifications for the internal equipment of CubeSats, but in general, many manufacturers and organizations use compatible sets of standard equipment, which allows for a relatively short time to assemble a working satellite with a specific purpose [4, 5].

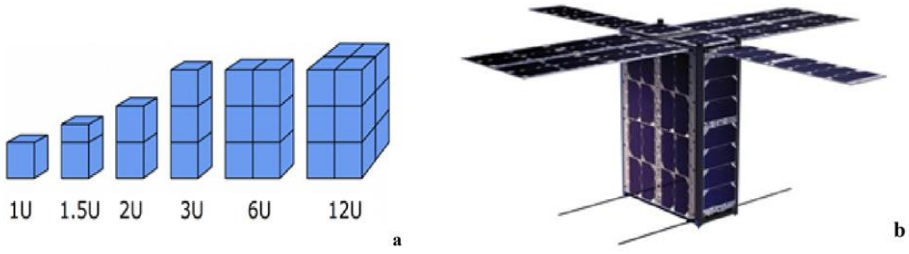


Fig. 1 a, b. Standard “CubeSat Design Specification” in geometric progression (a) and in orbital version with solar panels deployed (b)

This article considers the possibility of providing part of the tasks for optical registration of Space Debris (SD) to CubeSat technology. Space debris in the article should be understood as objects of artificial origin that no longer serve their original purposes and have uncontrolled movements and orbital parameters in near-Earth space. The sizes of these objects range from fractions of a millimeter to one meter or more [6]. Space debris larger than 10 cm are observed from Earth using radar technology [7]. At the submillimeter scale, their population can be studied by direct detection, for example, using piezoelectric dust detectors, including those mounted on CubeSat satellites [8, 9]. For those with a size of 1 mm to 10 cm, both methods are not applicable, the most effective being the search and registration of these objects using equipment located directly in space. The same can work in the optical range, i.e. to observe space debris based on the white light coming from the Sun reflected by them.

It must be said that man-made debris of this size is of the greatest interest from the point of view of ensuring the safety of space flights. This is due to the fact that although space debris larger than 10 cm are dangerous, they are few in number. Objects smaller than 1 mm are a large number, but they do not pose a fatal threat to satellites. However, those whose sizes range from 1 mm to 10 cm are, first of all, a large number of objects, as their mass and speed are large enough in kinetic impacts to cause fatal consequences [10, 11].

The article consists of four sections. The first presents the results of space debris research at the current stage. The second describes a conceptual design for creating optical observation equipment for CubeSat. The third describes the most suitable CubeSat orbits, where this equipment would be most effective for detecting, tracking and precise localization of space debris with sizes from 1 mm to 10 cm. The last section contains brief conclusions and inferences on the topic.

Materials and Methods

A. The problem of Space Debris

The main negative effect of the efforts of Mankind in the exploration of Space is its progressive pollution with man-made products accompanying space activities. The following fact is indicative. For almost 70 years of the space age, more than 5500 launches of Artificial Earth Satellites (AES) have been carried out. A small part of them fall into the Catalog of space objects that are observed by ground observatories. Many of them have an exhausted resource and form the list of so-called space debris [12]. This problem has become especially relevant in the last 20 years, in connection with a number of man-made disasters in space and the increase in the number of countries launching satellites [13], [14]. A huge number of scientific articles and books have been written about the causes and consequences of pollution of near-Earth space [15], [16]. The spent large satellites and their groups have been observed and cataloged as space debris, but the danger of small-sized SD is often ignored, and they are associated with the biggest problems for the space invasion of civilization (Fig. 2). Obtaining a more complete understanding of space debris (their quantity, composition, distribution in space, dynamics and potential danger) is hindered by at least two factors: a clear underestimation of the real danger of small debris and the shortage of appropriate observational measurements, which is a direct consequence of the lack of instruments capable of observing them [17].

Fig. 2. Distribution and concentration of the main clusters of space debris located in Earth orbits

When assessing the degree of danger from space debris, it is necessary to know not so much their mass as the number and speed of individual particles. Unlike small-sized debris, many spent spacecraft are launched into suitable low orbits and directed to descend into the dense layers of the atmosphere, in which they burn up. However, this is impossible for those of them that are in relatively high orbits [18], [19]. A very clear and indicative comparison is the determination of the growth of small space debris (with a size of 1 mm to 10 cm) for three years in one of the most "populated" orbital regions (at altitudes of 800 to 900 km) according to real observations with Haystack and HEX radars made in 2006 and 2009. This increase then averaged 20...30% (ibid.: [18]). Today (as of February 2025) it reaches dangerous levels of 45%, which threatens the existence and functioning of a number of satellite constellations in these regions of near-Earth space [20, 21, 22].

B. Various types of danger from space debris:

1) When controlling artificial satellites of the Earth and manned missions, carrying the threat of a potential collision with them;
2) For the population of the Earth and ground structures (especially for nuclear facilities and facilities for storing chemical and bacteriological weapons) as a result of falling large fragments of space debris;
3) On the ecology of the Earth and near-Earth space, reducing the transparency of near-Earth space and the atmosphere (which disrupts the exchange of light and heat that has developed over billions of years between the Earth and Space, and also creates interference in astronomical observations - mainly in the optical range;

4) On the degree of pollution of near-Earth space, provoking and accelerating a cascade effect as a result of collisions not only with existing space debris, which leads to its rapid increase.
As for large-sized space debris, the most immediate danger is posed by those falling into the 1st, 2nd and 4th categories. From the point of view of the danger to space activities in orbit around the Earth, the difference between small-sized space debris and large-sized ones is as follows:
1) Small-sized space debris is not catalogued and does not have sufficiently accurate data on its motion vectors, therefore collisions with it are unpredictable and cannot be avoided;
2) The amount of small orbital debris is at least several orders of magnitude greater than that of large ones, and this difference is progressively increasing;
3) The spatial distribution of small orbital debris clusters and their kinetic parameters change faster than the distribution and motion parameters of large ones, due to the larger surface area to mass ratio;
4) The real danger of a collision with small space debris (even in the submillimeter range) for operating spacecraft cannot be ignored;
5) A decrease in the transparency of near-Earth space and the atmosphere, which occurs mainly due to the accumulation of fine particles of small space debris, increases or decreases the flux of solar radiation in the wavelength ranges that dissociate molecular oxygen and ozone at altitudes of 15 – 30 km, and this will lead to significant changes in the Earth's ozone layer;
6) The nature and degree of danger from small debris varies significantly and depends on the parameters of the collision (angle, vector of the particle's velocity to the surface of the spacecraft, vulnerability of the impact site, etc.);
7) Due to significant difficulties in observing small-sized space debris, there is very little data on the quantity, composition, concentration and orbital elements individual particles and its dynamics [23].

Results and Discussion

A. Conceptual design for optical observation equipment for CubeSat

When Many authors have reported on experiments related to orbital optical observations of small-sized space debris [24]. Our experience in optical ground-based observations of artificial satellites of the Earth and space debris shows that for this purpose, high-aperture lenses in combination with fast-acting CCD cameras are particularly suitable, which allow observing relatively faint satellites and fragments thereof (up to 12–14 magnitude) [25]. In this sense, our main idea for using them as optical observation equipment for CubeSat, which we present in this article, is also.

The CubeSat satellite that we propose to use has dimensions of 6U [26]. It is equipped with four side solar panels that can be opened in a *2 x 2* scheme. Inside it is a module with standard equipment for cubesats, occupying a size of 2U and two individually developed modules (Fig. 3). The first is two optical cameras with a size of 1.5 U, and the second is a module for solar orientation and stabilization with a size of 0.5 U. The orientation and stabilization module includes a slot, a solar sensor and six actuators [27]. The solar sensor works on the principle of a camera with an aperture and a small lens, which projects a focused image of the Sun onto four diodes. The diodes are placed at the edges of the solar image so that the solar disk only partially covers them.

When the observation tract deviates from the direction to the Sun, its image shifts, which leads to a change in the signal of the diodes. The corresponding changes are converted into an error signal, according to which the satellite returns to its original orientation with the help of three gyroscopic flywheels. The orientation of the device is towards the Sun. This orientation provides maximum illumination of the solar panels (maximum power about 20 W),

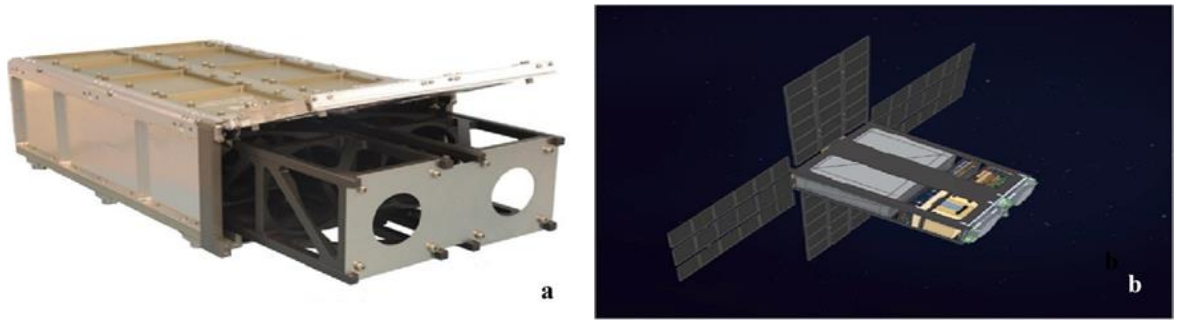


Fig. 3 a, b. Standard 6U CubeSat module with the internal framework
supporting the optical unit with two lenses (a), as well as four side solar panels (b)

While at the same time providing maximum illumination of the space debris from the sun's rays for the optics. The optical camera module includes two sunshades, two lenses, two CCD detectors, as well as four boards, a detector and a processor for built-in image processing. The aperture of the cameras is 80 mm. The dimensions of the CCD detectors are 1024 x 1024 pixels.

It is expected that when registering space debris from the CubeSat satellite, the specific object will be visible as an elongated, clearly distinguishable trail against the background of fixed stars. It is planned that both sensors will look in the same direction, and the trail of the object will be visible on both detectors. Such simultaneous observations allow, among other things, to distinguish situations when we have a real registration of space debris fragments as registrations are also possible because events occur when a charged particle hits the detector. In this case, a trace is also formed, but it is only visible to the one detector with which the particle interacts [28]. It should be noted that these two cases can be distinguished working with a single sensor equipped with a high-speed electronic shutter, which allows two consecutive images to be obtained in less time than the flight time of the specific fragment in the sensor's field of view. However, this introduces additional requirements for the design and control of the satellite in observational mode. The satellite is intended to perform primary processing of observations on board. Such processing is an analysis of the images in order to detect and record traces of space debris against the background of fixed stars. The presence of primary processing significantly reduces the requirements for the volume of information that must be transmitted by telemetry at a later stage. The size of the images from both cameras is about 4 MB. After the primary analysis, the information that must be recorded for tranmission to Earth for specific tracks of space debris on the images is small and 16–18 bytes are sufficient (these are only the coordinates of the end points of the specific tracks). This saves about 106 times the target data that would otherwise have to be transmitted.

The sensitivity of each of the cameras can be determined, in this case using formula (1), taken from the article [24], where D is the camera aperture (80 mm); F-focal length (80 mm); R is the distance to the object; α is the albedo of the object (we assumed it to be equal to 0.1); υ is the speed of space debris. The remaining parameters are characteristics specific to each CCD matrix, as well as the flux of solar radiation: h is Planck's constant $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s; c – speed of light $c = 3 \cdot 10^{8}$ m/s; λ – wavelength of electromagnetic waves λ = 500 nm; η – quantum efficiency η = 0.4; q is the ADC conversion coefficient q = 0.1; μ – size of the individual pixel of the CCD matrix μ = 13.5 μm; σ is the detector noise (approximately 20).

The calculated value of the minimum size of space debris that can be observed by the satellite is denoted by a:

$$a = \sqrt{(4hc\sigma RF\upsilon)/(q\eta d\lambda\pi D2P\mu)} \quad (1)$$

The sizes of space debris that can be recorded by the cameras, depending on the speed of the object and the distance to it, are given in Table 1.

Table 1. Sizes of space debris that can be recorded by the cameras, depending on the speed of the object and the distance to it.

R, km	Size, cm at υ = 1km/s	Size, cm at υ = 5km/s	Size, cm at υ = 10km/s	Size, cm at υ = 20km/s
1	0,2	0,6	0,8	1,1
10	0,8	1,7	2,5	3,5
100	2,5	5,6	7,8	11,0
500	5,5	12,3	17,4	24,7
1 000	12,2	25,5	35,6	62,2

Taking into account the above, a preliminary program can be made for the CubeSat satellite for observing space debris of different size. The planned field of view of the cameras is 8o. This provides a full sky overview with the realization of approximately 440 images, which corresponds to approximately one observing day of the CubeSat satellite's life (Fig. 4).

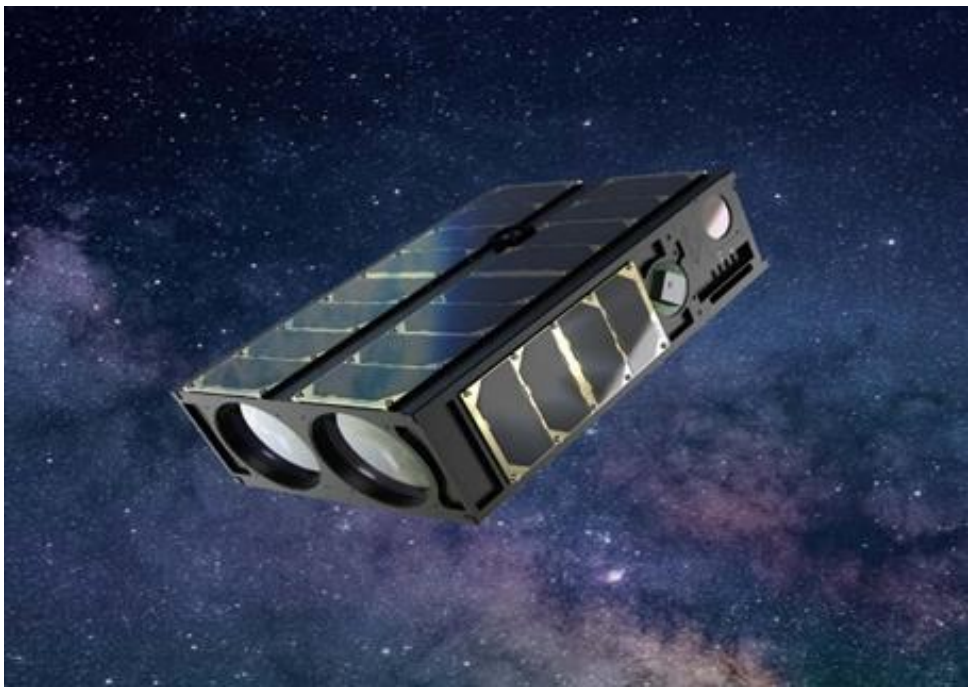


Fig. 4. General view of the CubeSat satellite for orbital registration of space debris in the operating position without open solar panels

The visibility range is from 10 km to 1000 km. In 120 days (the probable life of the cubesat) about 45,000 images can be obtained and a spatial volume of near-Earth space of 200 × 200 km for centimeter objects and approximately 20,000 × 20,000 km for 10-centimeter objects can be seen. The average probability of registering specific fragments is estimated as one event (track) per 100–200 images. Therefore, the total number of registrations could be 300–600 events, which can serve as a statistical estimate of the space debris population and its distribution by velocity at specific orbits.

Conclusions

In practical implementation and commissioning, the project for optical observation equipment for CubeSat can solve the following tasks:

- continuous observation in a certain time interval of space debris, the fragments of which are located in low-Earth orbit space;
- observation of space debris with a given rate and duration of tracking;
- generation of coordinate information for objects from the space orbital debris cloud, determination of the effective scattering area of individual fragments, the fact of possible rotation of the object;
- calculation of the orbital parameters of the movement of space orbital debris based on the accumulated measurements and determination of the dynamics and evolution of their movement.

Automation of data exchange between the telemetry of the CubeSat satellite and the ground center allows for effective use of the resources of the observation equipment and rapid receipt of information from it about the most important objects in the space debris cloud. The duration of the individual observation sessions was chosen as a compromise between achieving a relatively high accuracy in determining the motion parameters of individual fragments and saving energy and time resources of the satellite. The average duration of satellite observation by CubeSat is sufficient for reliable determination of orbital parameters of space debris in the range of 1 – 10 cm and is about 1 to 2 minutes.

References:

1. N. Zosimovych, Z. Chen, CubeSat Design and Manufacturing Technique Analysis. IOSR Journ. of Eng. (IOSRJEN), Vol. 8, 9: 2018, p. 01–06
2. T. Villela, C. A. Costa, A. M. Brandão, F.T. Bueno, R. Leonardi, Towards the thousandth cubesat: A statistical overview., International Journal of Aerospace Engineering., 2019. https://doi.org/ 10.1155/2019/5063145
3. CubeSat Design Specification (CDS): Rev. 13. California Polytechnic State University, 2015, p. 41
4. Larson W. J., Wertz J. R., Space Mission Analysis and Design, third edition, Space Technology Library-Microcosm Press, California, 2004
5. C. Girardello, M. Tajmar, C. Scharlemann, GREATCUBE+: conceptual design tool for CubeSat's design., CEAS Space Journal, 16., 2024, p. 375–392. https://doi.org/10.1007/s12567-023-00509-9
6. H. Klinkrad, Space Debris. Models and Risk Analysis., Springer, 2006, p. 430
7. J. Hamilton, NASA Develops Report on Radar Observations of Small Debris Populations // Orbital Debris Quarterly News., V. 17, Iss. 4, 2013, p. 4–5
8. G. Drolshagen, T. Nehls, The Small Size Debris Population in the GEO Belt // Proc. 5th European Conf. Space Debris. ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, V. 5. Iss. 1., 2009
9. K.M. Brumbaugh, H.C. Kjellberg, E. Lightsey et al., In-situ sub-millimeter space debris detection using cubesats // Advances in the Astronautical Sciences. V. 144., 2012. p. 789–803
10. T. Hanada, Using Breakup Models and Propagators to Devise Debris Search Strategies in GEO // Advances in the Astronautical Sciences. v. 110., 2002, p. 373–385
11. T. Hanada, Theoretical and empirical analysis of the average crosssectional areas of breakup fragments // Ad vances in Space Research., v. 47., 2011, p. 1480–1489
12. E. M. Levin, Dynamic analysis of space tether missions. San Diego: American Astronautical Society., 2007., p. 453
13. D. J. Kessler, B. G. Cour-Palais, Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt // J. Geophysical Research., 1978, p. 83
14. D. J. Kessler, Collisional Cascading: The Limits of Population Growth in Low Earth Orbit // Advances in Space Research. v. 11., Iss. 12., 1991, p. 63–66
15. R. C. Reynolds, A Review of Orbital Debris Environment / JSC // Orbital Debris Conf. Apr. 16–19, 1990, Baltimore, MD., AIAA-90-1355., 1990, p. 22
16. H. Klinkrad, Space Debris. Models and Risk Analysis., Springer, 2006. p. 430
17. D. Drolshagen, D. Koschny, S. Drolshagen et all., Mass accumulation of earth from interplane_tary dust, meteoroids, asteroids and comets // Planetary and Space Science. v. 143., 2017, p. 21–27
18. J. Hamilton, NASA Develops Report on Radar Observations of Small Debris Populations // Orbital Debris Quarterly News., v. 17. Iss. 4., 2013, p. 4–5
19. Interagency Report on Orbital Debris / Office of Science and Technology Policy; White House., 1995, p. 86
20. J.C. Liou, N. L. Johnson, A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO // Ad vances in Space Research., № 47., 2011, p. 1865–1876
21. J. C. Liou, An active debris removal parametric study for LEO environment remediation // Progress in Pro pulsion Physics., v. 4., 2013, p. 735–748
22. J. C. Liou, M. Matney, A. Vavrin et al., NASA ODPO's Large Constellation Study // Orbital Debris Quarterly News., v. 22., Iss. 3., 2018, p. 4–7
23. A. Potter, Early detection of Collisional cascading // Proc. 1st European Conf. Space Debris, ESA/ESOC. Darmstadt, Germany, v. 1. Iss. 1., 1993
24. S.V. Kuzin, A.S. Ulyanov, S.V. Shestov et al., Observation of space objects using optical sensors in the SPIRIT/CORONAS-F and TESIS/CORONAS-Photon experiments // 3rd All-Russian scientific and technical conf. "Modern problems of orientation and navigation of spacecraft": collection of papers. September 10–13, 2012, Russia, Tarusa / edited by G. A. Avanesov., 2013, pp. 58–68. (in Russian)
25. O. Ognyanov, P. Stoeva, A. Stoev, Y. Shopov, Ground-based optical observations of space debris: current review and prospects., In Proceedings of the scientific conference "Near Space - a Common Goal", May 10-11, 2022, Publishing House of the National University "Vasil Levski", 2022, pp. 7–17. ISSN 2815-3529 CD (in Bulgarian)
26. 6U CubeSat Design Specification: Rev. Provisional (CP-CDS-PROVISIONAL). California Polytechnic State University., 2016, p. 27
27. G. Ridolf, E. Mooij, S. Corpino, A System Engineering Tool for the Design of Satellite Subsystems., 2009. https://doi.org/10.2514/6. 2009-6037 11

EVOLUTION OF CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE SOLAR CORONA WITH THE PHASE OF SOLAR

Penka Stoeva, Desislava Teneva, Alexey Stoev

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

Keywords: *Shape of the solar corona, heliospheric current layer, cyclicity of solar activity*

Abstract: *The structure of the solar corona is investigated in relation to the dynamics of the heliospheric current layer (HCL) during the 25th Schwabe-Wolf cycle of solar activity, using a series of images of the solar corona taken during the total solar eclipse of April 8, 2024, observed from Kerrville, Texas, USA. A relationship is sought in the distribution of the radial component of coronal structures (at a height above 2.5 solar radii). The conclusion reached earlier by other authors that the configuration of the HCS determines the main structural features of the white corona is confirmed.*

ЕВОЛЮЦИЯ НА ПРОМЕНИТЕ В СТРУКТУРАТА НА СЛЪНЧЕВАТА КОРОНА С ФАЗАТА НА СЛЪНЧЕВАТА АКТИВНОСТ

Пенка Стоева, Десислава Тенева, Алексей Стоев

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

Ключови думи: *Форма на слънчевата корона, хелиосферен токов слой, цикличност на слънчевата активност*

Резюме: *Изследвана е структурата на слънчевата корона, свързана с динамиката на хелиосферния токов слой (ХТС) по време на 25-ия цикъл на Швабе-Волф на слънчевата активност, използвайки серия от снимки на слънчевата корона, направени по време на пълното слънчево затъмнение на 8 април 2024 г., наблюдавано от гр. Кервил, щат Тексас, САЩ. Потърсена е връзка в разпределението на радиалния компонент на коронални структури (на височина над 2,5 слънчеви радиуса). Потвърждава се заключението, до което са стигнали по-рано и други автори, че конфигурацията на ХТС определя основните структурни характеристики на бялата корона.*

Introduction

More than 40 years ago, the idea was proposed that a collection of large helmet-shaped coronal rays forms a closed belt around the Sun, and that this belt is the base of the heliospheric current layer (see, for example, [1]). It is known that the heliospheric current layer (HCL) divides the solar space into two parts with opposite (away from and towards the Sun) directions of the interplanetary magnetic field. A detailed justification of the idea that the helmet-shaped radiation belt is identical to the base of the HCL is provided in [2], but the analysis carried out there is statistical in nature. Observations of several total solar eclipses (1932, 1991, 2012) have provided a unique opportunity to directly compare the structure of the corona with the orientation of the heliospheric layer.

The shape of the corona changes with the phase of the 11-year solar cycle. Figure 1 shows a schematic representation of typical coronal shapes for the minimum and maximum periods of the 11-year solar cycle, according to canonical concepts in solar physics.

At minimum activity (Figure 1a), the corona has two systems of helmet-shaped rays ("fans"), elongated along the equator, and in the north and south, systems of short rays, the so-called polar brushes, are observed (TSE - 2006).

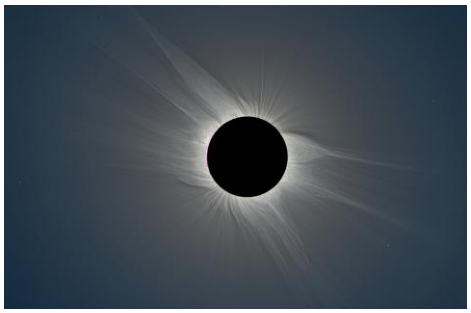


Fig. 1 a

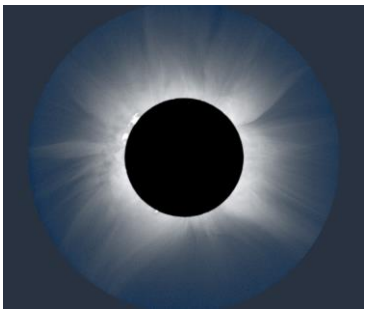


Fig. 1 b

At maximum activity (Figure 1b), the helmet-shaped rays are distributed relatively evenly throughout the solar limb (TSE – 1990). During the transition from minimum to maximum activity, the appearance of the corona, according to generally accepted concepts, should gradually evolve from one extreme form to another.

The concept of the relationship between the solar corona and the heliospheric coronal current layer, developed in [2], allows us to approach the evolution of coronal shapes from a new perspective. At the minimum of the 11-year cycle, the HCL is located close to the plane of the solar equator, and an observer on Earth should see the base of the HCL practically as an edge. This determines the characteristic shape of the “minimum” corona. During other periods of the 11-year cycle, the inclination of the HCL to the equator varies widely, up to 90° at the maximum of the cycle, and its orientation relative to the observer can be arbitrary. This, in particular, explains the variety of coronal shapes during total solar eclipses (Figure 2, a, b).

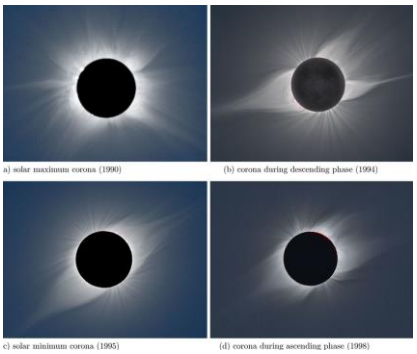


Fig. 2 a

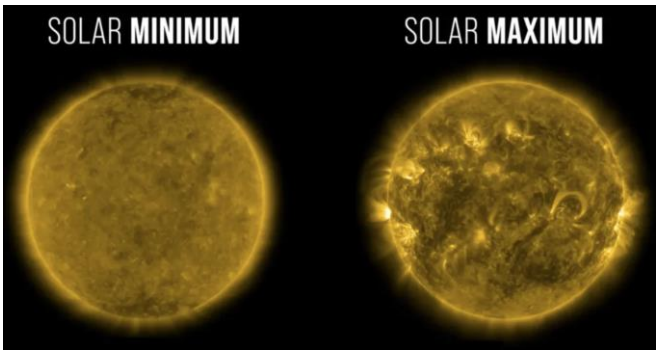


Fig. 2 b

Images from NASA's SDO satellite (Fig. 2b) show the appearance of the Sun during solar minimum (left, December 2019) compared to solar maximum (right, May 2024).

In certain cases, the heliospheric layer is tilted towards the equator, but oriented along the line of sight, i.e., edge-on to the observer. In such a position, a completely unusual pattern from a canonical point of view should be observed: a "minimal" corona tilted towards the equator. However, since the orientation of the heliospheric layer can be arbitrary, and total solar eclipses on Earth are rare, the probability of observing such a pattern is low. A similar situation occurred during the eclipses of August 31, 1932, and July 11, 1991 (also in [2]).

Heliospheric current layer (HCL)

The heliospheric current layer is a surface in the Solar System across which the polarity of the solar magnetic field reverses. This surface extends along the equatorial plane of the Sun and reaches the boundaries of the heliosphere. The shape of the current sheet is determined by the influence of the Sun's rotating magnetic field on the plasma in interplanetary space. The thickness of the current sheet is approximately 10,000 km. Within the current sheet, a weak electric current (hence the name!) is observed - approximately 10^{-10} A/m². The resulting current is part of the heliospheric current circuit. The heliospheric current sheet is sometimes called the interplanetary current layer. The HCL is a relatively thin, large-area current configuration embedded in a wider plasma sheet (Figure 3 a, b).

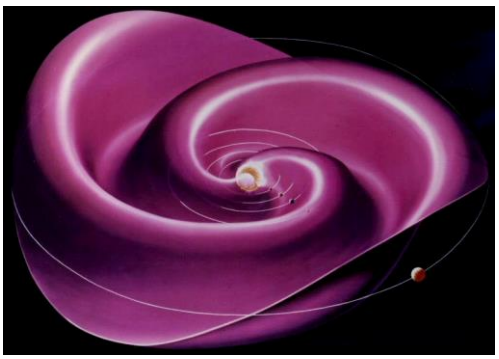


Fig. 3 a

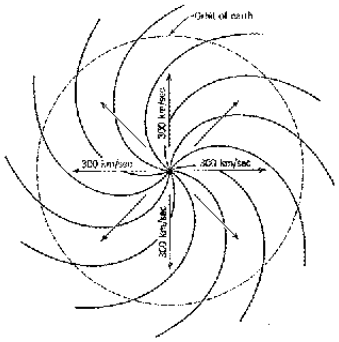


Fig. 3 b

In addition, the HCL usually contains a shear (along the streamlines) component of the magnetic field. The presence of high-energy solar cosmic particles in the HCL can change its structure, leading to the formation of nested plasma structures and the appearance of extremely large coronal structures. Current equilibrium in the HCL is achieved at different temperatures of the solar cosmic rays and different high-energy plasma concentrations. The heliospheric current sheet rotates with the Sun, making one rotation every 27 days. During this period, the Earth, together with its magnetosphere, passes through the maxima and minima of the current sheet, interacting with it. At this time, the magnetic induction at the surface of the Sun is approximately 10^{-4} Tesla. If the magnetic field were in the form of an ideal dipole, its strength would decrease proportionally to the cube of the distance and would be 10^{-11} Tesla near Earth's orbit.

Solar corona as an optical manifestation of the heliospheric current layer

Based on its structural properties, the solar corona is clearly divided into two parts: the inner, consisting mainly of contour structures, and the outer. Contour structures in the solar corona are contour-like structures formed by the magnetic field confining relatively cold solar plasma. The main examples of such structures are prominences, as well as loops and filaments, which are visible as curved shapes above the solar surface and in the corona. The main structural element of the outer corona, determining the global scale pattern of the entire corona, are the helmet-shaped rays extending far into interplanetary space. The transition from the inner to the outer corona occurs in the range of heliocentric distances r from 1.5 to 2 solar radii.

On the other hand, the heliospheric current layer (HCL) is the surface of separation of the polarity of the interplanetary magnetic field (IMF). The configuration of the base of the HCL is well described by the neutral line of the IMF on the “source surface” (r ≈ 2.5 Sun radius), calculated by extrapolating magnetic field measurements on the photosphere. Studies in recent years have shown that the helmet-shaped coronal rays are not randomly distributed over the Sun, but rather form a closed belt around it, and this belt corresponds to the base of the HCS (High Common Sunset – Coronal System of the Sun). It can be said more precisely: the helmet-shaped coronal ray belt is a visible (optical) manifestation of the HCS near the Sun, and the rays themselves are structural elements of the HCS (Fig. 4a, b).

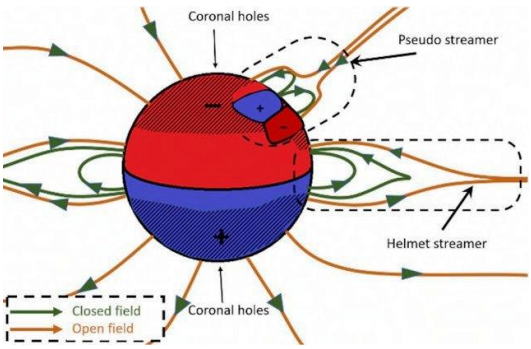


Fig. 4 a

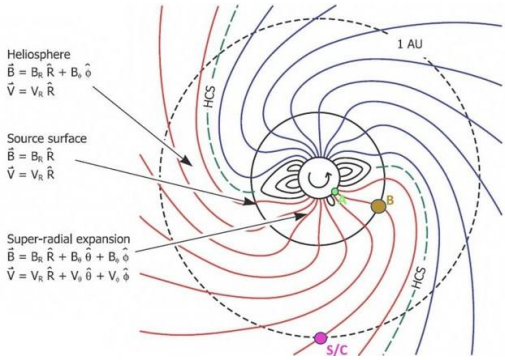


Fig. 4 b

To study the evolution of the spatial orientation of the HCS, the concept of a HCS midplane has been introduced [4]. The position of the midplane, determined purely geometrically, for example by the configuration of the neutral line on the surface of the source, corresponds well to the dipole

component of the solar magnetic field. The perpendicular to the midplane passing through the center of the Sun can be considered the HCS axis, and the points of its intersection with the solar surface are the HCS poles or the magnetic poles of the Sun. A number of patterns have been identified in the change in the orientation of the HCS during the 11-year solar activity cycle. In particular, the inclination of the HCS midplane to the plane of the solar equator varies from almost zero at the minimum of the cycle to ~70° at times approximately 1 year before and ~1 year after the maximum of the cycle [4]. During the approximately 2-year period of maximum solar activity, the configuration of the HCS is so complex and changes so rapidly that defining the midplane becomes impossible and the very concept of a midplane apparently loses its meaning.

The analysis shows that for most of the 11-year cycle, the actual configuration of the HCS base deviates little from the mean plane. Analysis of a 15-year time interval, including all phases of the 11-year cycle except the maximum, shows that for 43% of the time the standard deviation of the HCS base from the plane does not exceed 10°, and for 73% it does not exceed 15°. Thus, the HCS base and therefore the helmet beam belt can be considered to be largely a flat structure. It is likely that some analogy can be drawn between the appearance of the corona in 3D space and the shape of spiral galaxies [5, 6].

It is this impressive variability of the solar corona that is well known to observers of total solar eclipses during their phase evolution. At the minimum of the 11-year cycle, the corona has two systems of helmet-shaped rays, elongated along the equator; at the maximum, the helmet-shaped rays are distributed more or less evenly throughout the entire solar halo. According to generally accepted ideas, during the transition from the minimum to the maximum of the cycle, the appearance of the corona should gradually evolve from one extreme form to another. Repeated attempts have been made to classify the structure of the corona depending on the phase of the 11-year cycle, but it has not been possible to establish a completely unambiguous connection between these two phenomena.

The fact of the small deviation of the outer corona from the equatorial plane allows us to formulate a new view of the evolution of the corona in the 11-year cycle. During most of the cycle, the shape of the corona in 3D space changes little, while the observed variety of coronal shapes is determined primarily by changes in the orientation of the corona relative to the observer. The above should be considered as a first approximation, characterizing the most general properties of the global structure of the corona. The real picture, of course, is richer and more complex. In particular, during a quarter of the period under consideration, the root-mean-square deviation of the base of the CTS from the plane exceeds 15°, reaching 45°. This is mainly due to the contribution of the enhanced quadrupole component of the magnetic field, and a consequence of this situation may be a four-sector structure of the MMF in the ecliptic plane. The “flat” state of the corona, existing for most of the 11-year cycle, can be arbitrarily called (by analogy with atomic systems) the ground state of the corona, and all other states can be called excited states [7].

Observations and image processing

To observe the solar eclipse of 2024 (with a total phase of up to 2.5 minutes), the Astronomical Observatory and Planetarium in Stara Zagora organized an observation expedition to Argentina. One of the scientific tasks of the expedition team was to study the structure of the corona in white light [8]. To analyze the structure, direct images of the inner and middle corona (observer P. Maglova) and images of the outer corona obtained by special photometric processing were used, which show a detailed structure of the corona in the radial direction. Figures 4a and 4b show two of the composite images of the outer corona of the Sun, where the general appearance of the structure of the white corona is visible.

Fig. 5 a

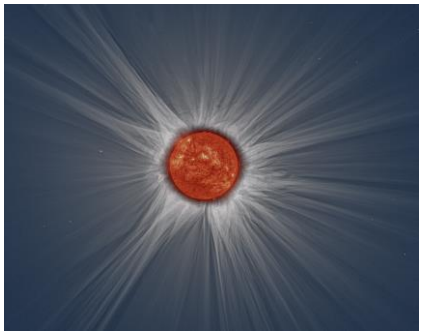


Fig. 5 b

The moment of the eclipse coincides with the beginning of the maximum of the 25th 11-year solar cycle. Therefore, based on generally accepted concepts, one would expect the corona to have a shape close to the “maximum” type. Figures 5a and 5b show that the true shape of the 2024 corona has numerous elements of coronal structures characteristic of a minimal type of corona. These coronal structures of the “minimal type” are associated with two diametrically opposed systems of multiple plumes (brushes, rays), as well as polar brush-like structures between them. Interestingly, this corona with elements of a minimal also shows a serious inclination towards the solar equator. Thus, Fig. 4b demonstrates the inconsistency of the canonical scheme of coronal shape evolution applied to the 2024 corona. At the same time, the observed picture fits very well into the situation outlined above.

To determine the orientation of the mean plane of the heliospheric current layer near the Sun, we used synoptic maps of the magnetic neutral line at a heliocentric distance of 2.5 to about 8 solar radii, published in the Solar Geophysical Data (USA) bulletin. The method for determining the mean plane of the HCL is described in [9, 10]. Calculations based on data from preliminary ephemerides show that the mean plane of the HCL on the day of the eclipse was inclined by 34° to the plane of the solar equator and at the same time was oriented at a relatively small angle to the observer's line of sight. In other words, in 2024 the rare case of orientation of the HCL discussed above actually occurred.

Conclusion

As can be seen from Figure 4a, the solar surface along the midplane of the heliospheric current layer on the day of the eclipse. This shows that there is an excellent correspondence between the orientation of the heliospheric current layer and the directions of the coronal rays. Thus, the observations of the 2024 solar eclipse provide once again experimental confirmation of the idea that the helmet-shaped coronal ray belt is identical to the base of the heliospheric current layer. In other words, the systems of helmet-shaped ray structures can indeed be considered a visible (optical) manifestation of the heliospheric current layer. We believe that in light of the above, existing methods for predicting the structure of the coronal layer should be optimized taking into account the orientation and instantaneous state of the heliospheric current layer.

Literature:

1. Hoeksema J.T.// Adv. Space Res. 1989. V. 9, №. 4. P. 141
2. Гуляев Р.А., Ванярха Н.Я. Препринт ИЗМИРАН, 1991, № 10(957). 16 с.
3. Korzhov N. P. Large-scale nhree-dimensional structure of the interplanetary magnetic field / N. P. Korzhov // Solar Physics. – 1977. – Vol. 55. – P. 505–517
4. Коржов Н. П. Магнитная структура системы Солнце – межпланетная среда / Н. П. Коржов // Исслед. по геомагнитизму, аэролномии и физике Солнца. – М. Наука, 1979. – Вып. 49. – С. 62–74
5. Wiegelmann T., G. J. D. Petrie, P. Riley, Coronal magnetic field models. Space Sci. Rev. 210, 2017, 249–274
6. Pasachoff J. M., Rus V., Druckmuller M., Saniga M., Fine structures in the white-light solar corona at the 2006 eclipse., The Astrophysical Journal, № 1, 665: 2007, p. 824–829
7. Zirker J.B., Koutchmy S., Nitschelm C et al. Structural changes in the solar corona during the July 1991 eclipse Astron. and Astrophys. -1992. -Vol258. -P. L1–L4
8. Мъглова П., Стоев А., Костов М., Тенева Д., Короната на Слънцето наблюдавана по времето на Великото Североамериканско пълно слънчево затъмнение на 8 април 2024 г., TWENTIETH ANNIVERSARY INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE „S P A C E, E C O L O G Y, S A F E T Y (S E S) 2024”, 2024, стр. 58
9. Schrijver C. J., M. L. DeRosa, Photospheric and heliospheric magnetic fields. Sol. Phys. 212, 2003, 165–200
10. Schmelz J. T., D. V. Reames, R. von Steiger, S. Basu, Composition of the solar corona, solar wind, and solar energetic particles. Astrophys. J. 755, 33, 2012.

Session 2

Aerospace Technologies and Biotechnologies

Chairmen: Prof. Georgi Sotirov

Secretary: Assoc. Prof. Konstantin Metodiev

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

TRAJECTORY CONTROL FOR A QUADCOPTER

Konstantin Metodiev

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

Keywords: *Quadcopter, PID controller, GNU Octave*

Abstract: *This article presents a mathematical framework for modeling the spatial motion of a quadcopter. The model incorporates a proportional-derivative (PD) controller to maintain the quadcopter's attitude and make it follow an initially assigned path. A system of first-order ordinary differential equations (ODEs) with constant coefficients describes both linear and angular momenta conservation. To solve these equations, the explicit Dormand-Prince method of order 4 with adaptive time stepping, implemented via the ode45 function in GNU Octave, is employed. The algorithm is well-suited for non-stiff ODE systems. The study further analyzes the performance of the PD controller, presenting the simulation results graphically and discussing the effectiveness of the control strategy in stabilizing the quadcopter's motion.*

ТРАЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ НА КВАДРОКОПТЕР

Константин Методиев

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

Ключови думи: *Квадрокоптер, ПИД регулатор, GNU Octave*

Резюме: *Тази статия представя математически модел на пространственото движение на квадрокоптер. Моделът включва пропорционално-диференциращ (PD) регулатор, който поддържа ориентацията на квадрокоптера в пространството и го заставя да следва първоначално зададен път. Система от обикновени диференциални уравнения (ОДУ) от първи ред с постоянни коефициенти описва съхранението на количеството на движение и кинетичния момент. За решаването на тези уравнения се използва явен метод на Дорманд-Принс от ред 4 с адаптивна стъпка на интегриране, реализиран чрез функцията ode45 в GNU Octave. Алгоритъмът е подходящ за не-твърди системи ОДУ. Изследването допълнително анализира производителността на регулатора, представяйки резултатите от симулацията графично и обсъждайки ефективността на стратегията за управление при стабилизиране на движението на квадрокоптера.*

Introduction

Quadcopter trajectory control requires guiding the quadcopter along a desired path or trajectory with precision and stability. The control process includes various control strategies and algorithms designed to manage the quadcopter's position, velocity, and orientation over time. For example, PID (Proportional-Integral-Derivative) control is a widely used feedback control strategy that can be effectively applied to a quadcopter's trajectory tracking.

The quadcopter's flight involves controlling its position (x, y, z) and orientation (roll, pitch, yaw) in space incessantly. When following a predefined trajectory, the control system minimizes the error between desired and actual position and orientation of the quadcopter. In the current project, two proportional-derivative controllers are implemented: one controls the orientation, while the other controls the position of the aerial vehicle. A proportional-derivative controller for quadcopter attitude has already been theoretically developed by Luukkonen in the monograph [1]. Regrettably, there is no source code available for public access. The current project sole purpose is to develop a source code in GNU Octave to examine the controller capabilities and propose improvements if feasible.

Materials and Methods

The body frame of reference (fixed to the quadcopter) provides a way to describe position, orientation, and motion of points or features relative to the body itself, rather than a fixed external point. In the current study case, the reference frame origin is placed at the quadcopter mass center. The axes are aligned with the quadcopter structure depending on the flight configuration: either "×" or "+," as shown in Fig. 1. In the current study, the flight configuration "x" is solely considered.

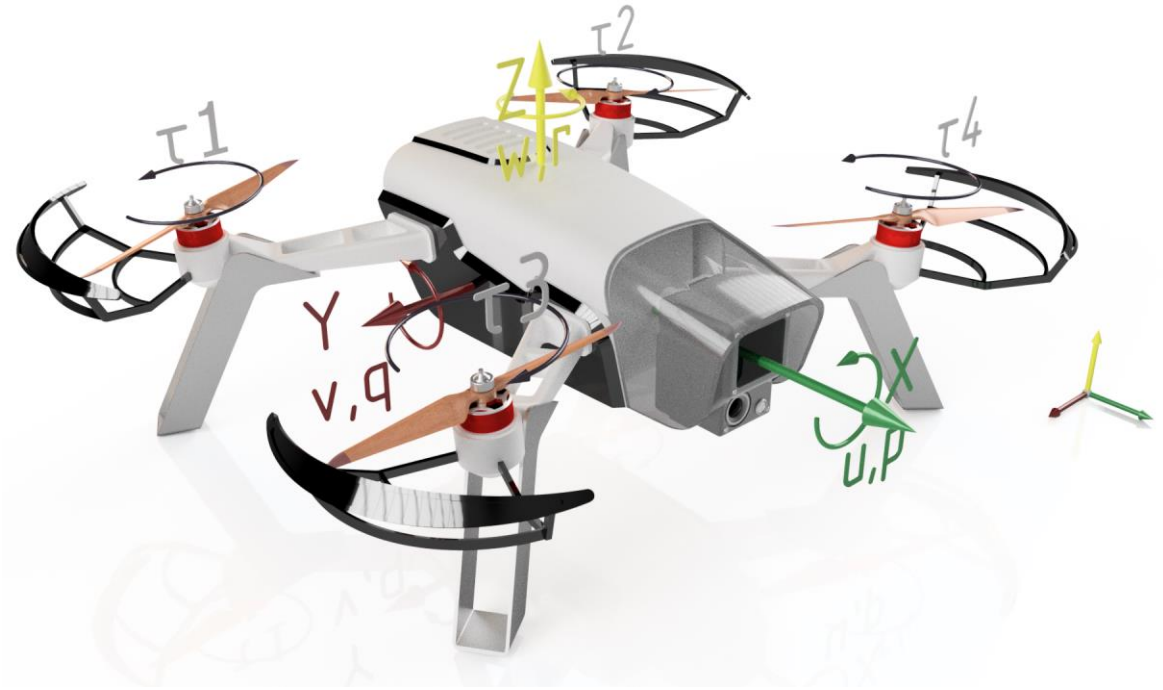


Fig. 1. Inertial and body reference frames, flight configuration "x", a simplified design [2]

Based on the symbolic conventions typically adopted in quadcopter motion analysis (as illustrated in Fig. 1), the state vector in the body reference frame is usually expressed as

$$\left\|\mathbf{v} \quad \boldsymbol{\omega}\right\|^T = \left\|u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r\right\|^T \tag{1}$$

where $\mathbf{v} = [u, v, w]^T$ are linear velocities, $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]^T$ are angular rates. The first-order system of ordinary differential equations describing the quadcopter's motion in body reference frame reveals conservation of both linear and angular momentum of the mechanical system as follows:

$$\begin{Vmatrix} m\mathbf{I}_{3,3} & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & \mathbf{I} \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} \boldsymbol{\omega} \times (m\mathbf{v}) \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau} \end{Vmatrix} \tag{2}$$

where $\mathbf{I}_{3,3}$ is a 3 by 3 identity matrix, $\mathbf{0}_{3,3}$ is a 3 by 3 zero matrix, m = const stands for the quadcopter mass, $\mathbf{f}$ and $\boldsymbol{\tau}$ denote externally applied forces and torques respectively. It is admissible to simplify the inertia tensor $\mathbf{I}$ further due to symmetry

$$\mathbf{I} = \begin{Vmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{Vmatrix} \tag{3}$$

The inverse of a diagonal matrix might be found after replacing the main diagonal elements with their reciprocals. As regards vector $[[\boldsymbol{\omega}\times(m\mathbf{v})]; [\boldsymbol{\omega}\times(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega})]]^T$, it might be alternatively computed by multiplying Coriolis centripetal matrix and the state vector as follows:

$$\begin{Vmatrix} \boldsymbol{\omega} \times (m\mathbf{v}) \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} [m\boldsymbol{\omega}]\times_{3,3} & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & [-\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}]\times_{3,3} \end{Vmatrix} \bullet \begin{Vmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{Vmatrix} \tag{4}$$

where symbol $[]\times_{3,3}$ denotes a skew symmetric matrix, for example

$$[m\boldsymbol{\omega}]\times_{3,3} = m \cdot \begin{Vmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{Vmatrix}; \quad [-\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}]\times_{3,3} = -1 \cdot \begin{Vmatrix} 0 & -I_{zz}r & I_{yy}q \\ I_{zz}r & 0 & -I_{xx}p \\ -I_{yy}q & I_{xx}p & 0 \end{Vmatrix} \tag{5}$$

Finally, the system first order ordinary differential equations with constant coefficients describing the quadcopter motion in body frame of reference assumes the conclusive form

$$\begin{Vmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} m\mathbf{I}_{3,3} & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & \mathbf{I} \end{Vmatrix}^{-1} \bullet \left(\begin{Vmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau} \end{Vmatrix} - \begin{Vmatrix} [m\boldsymbol{\omega}]\times_{3,3} & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & [-\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}]\times_{3,3} \end{Vmatrix} \bullet \begin{Vmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{Vmatrix} \right) \tag{6}$$

The vectorized form above is suitable for GNU Octave to perform calculations quickly.

Benić at al., [3] suggest using a hybrid coordinate system to solve the aforementioned governing equations. Specifically, the conservation of linear momentum is described in inertial frame, while the conservation of angular momentum is defined in body frame of reference. In this setup, the centripetal force **ω**×(m**v**) becomes zero, which also makes the top-left 3x3 part of the Coriolis matrix zero. External forces and torques [**f**, **τ**] acting on the quadcopter need to be transformed accordingly. In order to do this, the following rotation matrix might be used (assuming a ZYX rotation sequence) to convert between the body and inertial frames.

$$\mathbf{R} = \begin{Vmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\varphi - S_\psi C_\varphi & C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\varphi + C_\psi C_\varphi & S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi \\ -S_\theta & C_\theta S_\varphi & C_\theta C_\varphi \end{Vmatrix} \tag{7}$$

where Sx = sin(x) and Cx = cos(x). The transformation matrix **R** is orthogonal, hence $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^{\mathrm{T}}$.

Alternatively, the rotation matrix could be derived using quaternions. Given a normalized axis *a* and a rotation angle *θ*, the corresponding quaternion components are

$$q_w = \cos(\theta/2) \quad q_x = a_x \sin(\theta/2) \quad q_y = a_y \sin(\theta/2) \quad q_z = a_z \sin(\theta/2) \tag{8}$$

The formula above is successively applied to Cartesian components of the rotation axis, namely [ax,0,0], [0,ay,0], [0,0,az], and corresponding Euler angles [φ,0,0], [0,θ,0], [0,0,ψ], following an initially assigned sequence, for example XYZ. In this way, three quaternions are obtained, i.e. q1, q2, and q3 which are subsequently multiplied.

Quaternions are frequently split into a scalar term s and a vector term **v** as suggested for example in paper [4]:

$$q = \begin{bmatrix} s & \mathbf{v} \end{bmatrix} \quad s \in \mathbb{R} \quad \mathbf{v} = a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k} \tag{9}$$

Using the notation above, the quaternion product is computed using the formula

$$q_1 q_2 = (s_1 s_2 - \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2) + (s_1 \mathbf{v}_2 + s_2 \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2) \tag{10}$$

Then, based on Kuipers, [5], 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

$$\mathbf{R} = \begin{Vmatrix} 2(q_w^2 + q_x^2) - 1 & 2(q_x q_y - q_w q_z) & 2(q_x q_z + q_w q_y) \\ 2(q_x q_y + q_w q_z) & 2(q_w^2 + q_y^2) - 1 & 2(q_y q_z - q_w q_x) \\ 2(q_x q_z - q_w q_y) & 2(q_y q_z + q_w q_x) & 2(q_w^2 + q_z^2) - 1 \end{Vmatrix} \tag{11}$$

Externally applied force due to motor spinning written in body frame of reference is, [1]

$$\mathbf{T} = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ k\sum_{i=1}^{4} \omega_i^2 \end{Vmatrix} \tag{12}$$

Externally applied force due to quadcopter weight written in body frame of reference is, [1]

$$\mathbf{g} = \mathbf{R}^{-1} \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{Vmatrix} \tag{13}$$

where g = 9.81 m/s^2 is the Earth gravitational acceleration. The total external force vector applied to the quadcopter in body frame of reference is following sum

$$\mathbf{f} = \mathbf{T} + \mathbf{g} \tag{14}$$

Externally applied torque due to motor spinning written in body frame of reference depends upon the quadcopter flight configuration. Two distinct forms are following:

- Flight configuration “+”

(15)
$$\mathbf{E} = \begin{Vmatrix} lk\left(-\omega_2^2 + \omega_4^2\right) \\ lk\left(-\omega_1^2 + \omega_3^2\right) \\ b\sum_{i=1}^{4}\left(-1\right)^i \omega_i^2 \end{Vmatrix}$$

- Flight configuration “x”

(16)
$$\mathbf{E} = \begin{Vmatrix} lk\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2\right) \\ lk\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2\right) \\ b\sum_{i=1}^{4}\left(-1\right)^i \omega_i^2 \end{Vmatrix}$$

where k is lift constant, b is drag constant, l is distance between quadcopter mass center and motor axis. Externally applied torque due to gyroscopic effect written in body frame of reference is, [3]

(17)
$$\mathbf{o} = -\left(\boldsymbol{\omega} \times \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Vmatrix}\right) I_r \sum_{i=1}^{4}\left(-1\right)^i \omega_i$$

where Ir is the propeller moment of inertia. The total external torque vector applied to the quadcopter in body frame of reference is following sum

(18)
$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{E} + \mathbf{o}$$

Euler angles time rate of change (inertial frame of reference) is related to body frame angular rates according to following formulae, [6]:

(19)
$$\begin{Vmatrix} p \\ q \\ r \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & -S_\varphi \\ 0 & C_\varphi & C_\theta S_\varphi \\ 0 & -S_\varphi & C_\theta C_\varphi \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{Vmatrix}$$

(20)
$$\begin{Vmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 1 & S_\varphi T_\theta & C_\varphi T_\theta \\ 0 & C_\varphi & -S_\varphi \\ 0 & S_\varphi / C_\theta & C_\varphi / C_\theta \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} p \\ q \\ r \end{Vmatrix}$$

where Sx = sin(x), Cx = cos(x), and Tx = tan(x). Note singularity if θ = ±π/2 rad.

Linear acceleration in direction of z axis is affected by thrust T only (altitude controller) whilst angular accelerations of Euler angles roll φ, pitch θ, and yaw ψ are affected by torques τφ, τθ, and τψ respectively (attitude controller). Luukkonen, [1] suggests following proportional – derivative controller governing thrust and torques in hybrid reference frame:

(21)
$$\begin{aligned} T &= \left[g + K_{z,d}\left(\dot{z}_d - \dot{z}\right) + K_{z,p}\left(z_d - z\right)\right]\frac{m}{C_\varphi C_\theta} \\ \tau_\varphi &= \left[K_{\varphi,d}\left(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}\right) + K_{\varphi,p}\left(\varphi_d - \varphi\right)\right] I_{xx} \\ \tau_\theta &= \left[K_{\theta,d}\left(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}\right) + K_{\theta,p}\left(\theta_d - \theta\right)\right] I_{yy} \\ \tau_\psi &= \left[K_{\psi,d}\left(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}\right) + K_{\psi,p}\left(\psi_d - \psi\right)\right] I_{zz} \end{aligned}$$

The subscript d denotes “desired” state and Cx = cos(x). Motor angular velocities are computed from eq. (12), eq. (15), and eq. (16) according to adopted flight configuration. The “Symbolic” package available in GNU Octave was used to compute the required angular velocities with regard to thrust and torque vectors. Controller coefficients Kid and Kip (i = φ, θ, ψ) are borrowed from monograph [1], so are quadcopter overall dimensions and mass characteristics. Obtained results are following:

- Flight configuration “+”

(22)
$$\omega_1^2 = \frac{Tbl - 2b\tau_\theta - kl\tau_\psi}{4bkl} \quad \omega_2^2 = \frac{Tbl - 2b\tau_\theta + kl\tau_\psi}{4bkl}$$
$$\omega_3^2 = \frac{Tbl + 2b\tau_\theta - kl\tau_\psi}{4bkl} \quad \omega_4^2 = \frac{Tbl + 2b\tau_\theta + kl\tau_\psi}{4bkl}$$

- Flight configuration “x”

(23)
$$\omega_1^2 = \frac{Tbl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + b\tau_\varphi - b\tau_\theta - kl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\tau_\psi}{4bkl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} \quad \omega_2^2 = \frac{Tbl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - b\tau_\varphi - b\tau_\theta + kl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\tau_\psi}{4bkl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}$$
$$\omega_3^2 = \frac{Tbl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) - b\tau_\varphi + b\tau_\theta - kl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\tau_\psi}{4bkl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} \quad \omega_4^2 = \frac{Tbl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + b\tau_\varphi + b\tau_\theta + kl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\tau_\psi}{4bkl\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)}$$

PD controller coefficients for positioning within XY plane are derived through heuristics.

Results

Figures below present the quadcopter moving along initially assigned square and staggered paths (upper left), motor revolutions (upper right), roll angle (lower left), and pitch angle (lower right).

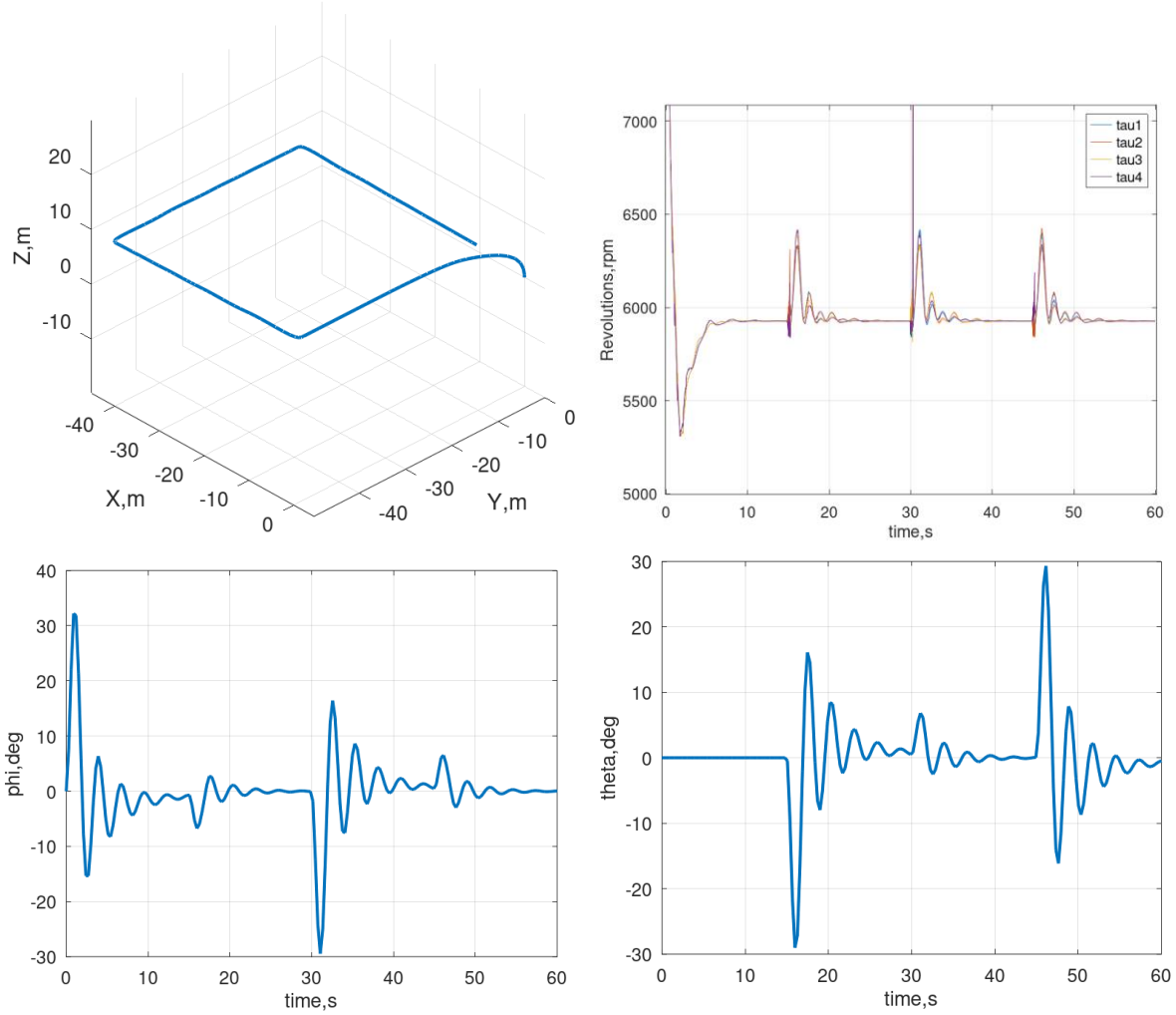


Fig. 2. The quadcopter following a square trajectory at altitude H = 10 m, yaw angle ψ = 0

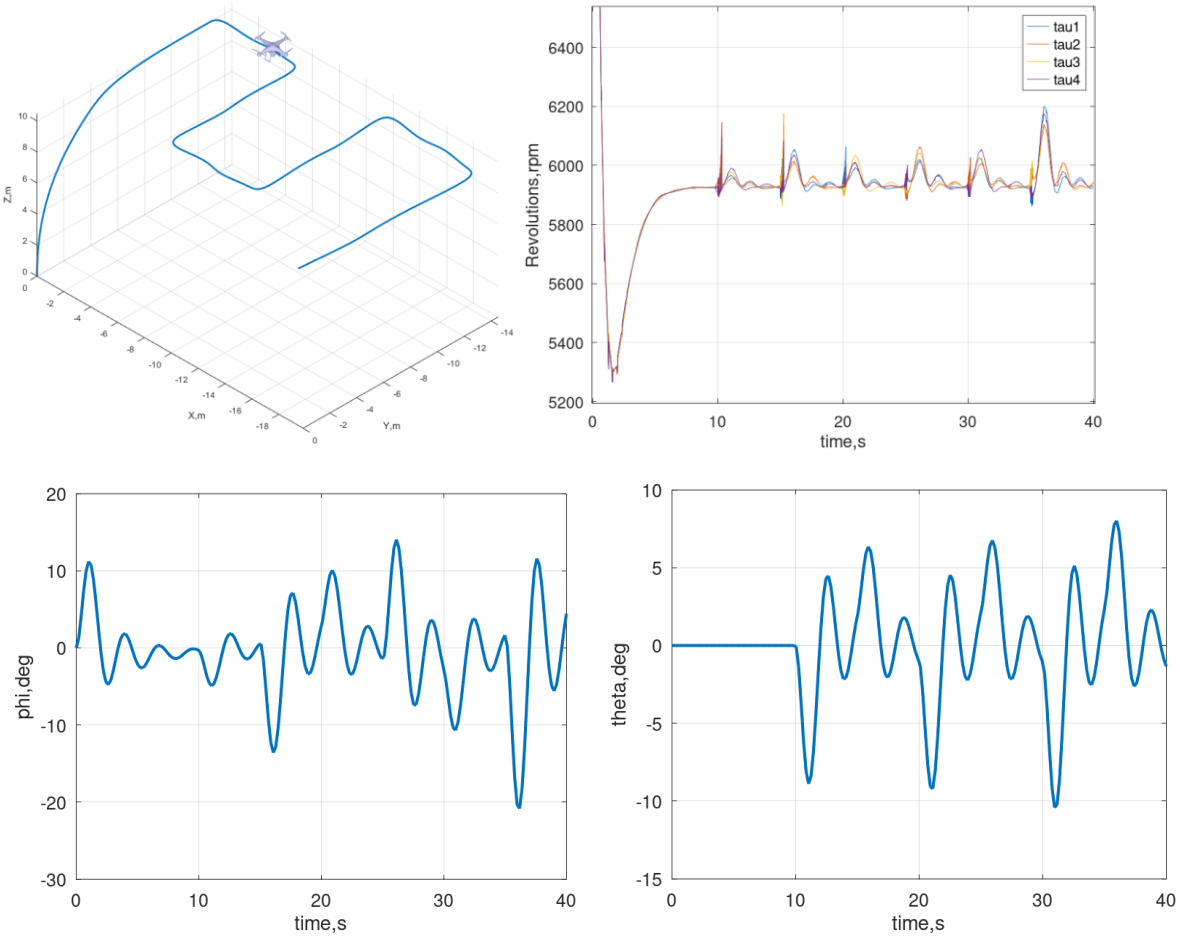


Fig. 3. The quadcopter following a staggered trajectory at altitude H = 10 m, yaw angle ψ = 0

Discussion

Integral additive fixes the controller output by adding up all the past errors over time. It helps eliminate steady-state error caused by constant biases or disturbances. If the actuator reaches its maximum limit, it can lead to integral windup, which causes overshoot and slows down the response. To prevent this, methods like conditional integration, back-calculation, and limiting the integral term are commonly used.

The Ziegler-Nichols method, [7] is a widely used approach for tuning PID controllers. It is straightforward and quick, but it can sometimes result in aggressive control, overshoot, or instability. Nevertheless, it is a good starting point for most applications including present research.

Software used to develop current research is GNU Octave, [8] with free license. The project source code might be downloaded from github.com [9].

References:

1. Luukkonen, T., Modelling and Control of a Quadcopter, research project, Aalto University, 2011 https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf
2. https://grabcad.com/library/wildlife-drone-1
3. Benić, Z., P. Piljek, D. Kotarski, Mathematical Modelling of Unmanned Aerial Vehicles with Four Rotors, Interdisciplinary Description of Complex Systems 14(1), 88–100, 2016
4. Wyss-Gallifent, J., Lecture notes Math431, Mathematics and Geometry for Computer Graphics, chapter Quaternions, Department of Mathematics, University of Maryland, 2021
5. Kuipers, Jack, Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality, Princeton University Press, 1999, ISBN 0-691-10298-8, p. 126
6. Alderete, T., Simulator Aero Model Implementation, NASA Ames Research Center, Moffett Field, California
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler-Nichols_method
8. https://octave.org/
9. https://github.com/samolet4e/Quadcopter/

PILOT'S PERFORMANCE ASSESSMENT THROUGH DATA MINING

Konstantin Metodiev

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

Key words: *Flight Simulator, Machine Learning, Cessna 172*

Abstract: *The report outlines an approach to evaluating the effectiveness of a light aircraft pilot in flight simulator during ILS landing procedure. In the course of flight task fulfilment, data from eye tracking measurements is being gathered. The data are further utilized for machine learning of several dichotomous classification models. The models' accuracy is assessed to facilitate the automatic ranking of pilots while executing the aforementioned task in particular.*

ОЦЕНКА НА РАБОТАТА НА ПИЛОТА ЧРЕЗ ИЗВЛИЧАНЕ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОТ ДАННИ

Константин Методиев

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

Ключови думи: *симулатор, машинно обучение, Сесна 172*

Резюме: *В доклада е представен метод за оценка работата на пилот на лек самолет в полетен симулатор при изпълнение на заход за кацане по ILS. По време на изпълнение на полетната задача се събира статистически материал от данни от окулография. Събраните данни са използвани за машинно обучение на няколко дихотомни модела за класификация. Точността на моделите е оценена, за да се използват за машинно класиране на пилоти при изпълнение на посочената задача.*

Introduction

In air transport and general aviation, data mining is used to enhance flight safety and assess pilot's performance in numerous ways. Airlines gather extensive amounts of flight information from aircraft sensors and cockpit audio recordings. Machine learning algorithms examine this data to identify patterns pointing to pilot behaviors, including compliance with procedures, reaction times, and management of unusual situations, for example repeated deviations from standard operating procedures to name but a few. What is more, machine learning models are capable of detecting typical pilot behaviors or system interactions that may suggest fatigue, stress, or insufficient training. These irregularities are subsequently examined to enhance pilot training programs or operational procedures. Data mining facilitates the comparison of pilots' performance to that of peers or predetermined benchmarks. This can enable individualized instruction by highlighting areas where a pilot excels or needs more training. In addition, data mining helps to analyze contributing factors, such as pilot reactions, in mishaps or near-misses. Better training programs centered on particular abilities or decision-making procedures may result from this realization. Last but not the least, airliners, using time-stamped records, employ predictive models to foresee possible safety risks, thus allowing for proactive responses before problems worsen. In general, these data-oriented strategies offer a more unbiased, thorough perspective on pilot performance, enhancing safety and efficiency in flight operations.

Current research involves a simple investigation of pilots' performance within a flight simulator environment utilizing eye tracker data and data mining algorithms, see for example study case [1].

Materials and methods

The proposed research employs decision tree, logistic regression, random forest, and k-nearest neighbor classification algorithms implemented in Orange, [2] data mining toolkit, in order to assess pilot's performance, Fig. 1.

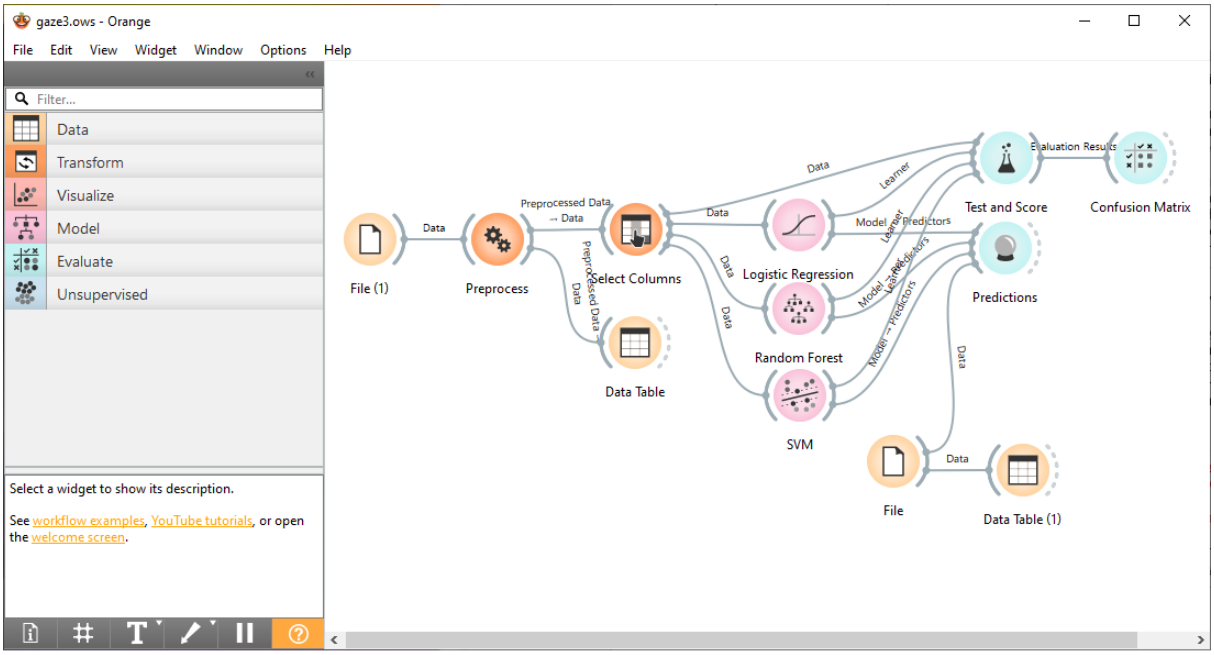


Fig. 1. Block diagram for validating models and making predictions in Orange IDE

The **logistic regression** is widely used classification method in machine learning. It's especially helpful for predicting binary results, such as yes or no, on or off, true or false, heads or tails, pass or fail, etc. The algorithm works by estimating the likelihood that a specific input belongs to a certain category. It achieves this by applying a logistic (or sigmoid) function to a weighted sum of the input features. The sigmoid function normalizes the output within [0; 1] interval which is why the output is dichotomous, i.e. it has only two possible outcomes.

The **random forest** classifier is a well-known machine learning algorithm employed in data mining for classification purposes. Throughout the training process, numerous decision trees are constructed, with each being trained on a random selection of data and features. Predictions from the trees are further combined to make a final decision. This randomness enhances precision and minimizes overfitting. The classifier is known for being robust, versatile, and effective with extensive datasets.

The **support vector machine** classifier is a supervised machine learning algorithm primarily used for binary classification tasks. It finds the optimal hyperplane that best separates two classes in the feature space, such as predicting whether the applicant will pass or fail. It is effective particularly when dealing with high-dimensional spaces and when the classes can be separated with categories that may not necessarily be linearly separable. This classifier is a preferred option in many applications because to its resilience and capacity to manage outliers and non-linear correlations.

The **confusion matrix** is a table that helps assess how well a classification algorithm is performing. It shows the number of correct and incorrect predictions, organized by each class. For instance, in case of a binary classification problem, the confusion matrix is a 2x2 table with following customary fields:

Table 1. Confusion matrix arrangement for a binary classification problem

	Actually positive	**Actually negative**
Predicted positive	True positives, TP	False positives, FP
Predicted negative	False negatives, FN	True negatives, TN

- True positives, TP: correctly predicted positive cases
- True negatives, TN: correctly predicted negative cases
- False positives, FP: incorrectly predicted positive cases (actually negative)
- False negatives, FN: incorrectly predicted negative cases (actually positive)

From confusion matrix elements, following performance metrics might be evaluated:

- Accuracy: (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)
- Precision: TP / (TP + FP)
- Recall (True Positive Rate, Sensitivity): TP / (TP + FN)
- Specificity (True Negative Rate): TN / (TN + FP)
- F1 Score: 2 * (Precision * Recall) / (Precision + Recall)

The correctly classified instances lie on the matrix main diagonal (colored in green).

For a multi-class classification, the confusion matrix expands to an NxN table, where N is the number of classes, showing the counts of actual vs. predicted class combinations. The confusion matrix provides detailed insight into how well the classifier is performing, especially in imbalanced datasets, where accuracy alone might be misleading.

The **ten-fold cross-validation** is a common method used in data mining to evaluate how well a predictive model works and whether it is applicable or not. It gives an estimate of how the model will perform on new data by dividing the dataset into 10 subsets, called folds. The model is trained on nine of these folds and tested on the remaining one. This process is repeated 10 times, each time with a different fold used for testing. The overall performance is then summarized by averaging metrics like accuracy, precision, recall, and F1-score across all 10 runs.

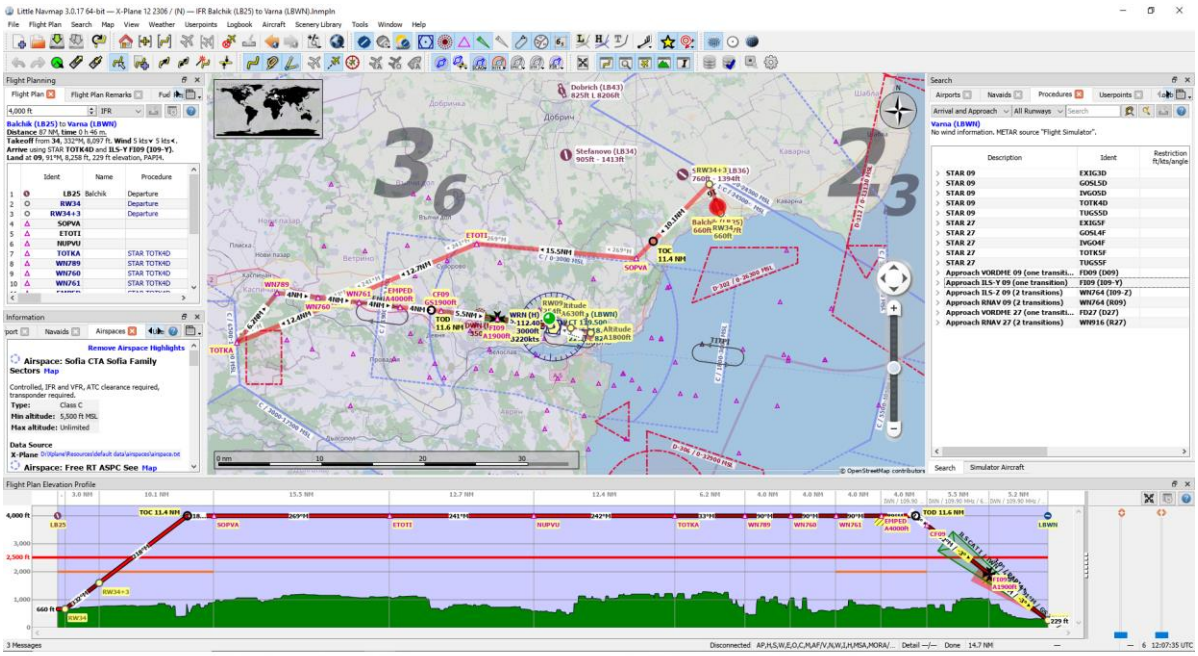


Fig. 2. Flight plan including standard terminal arrival route RWY 09 for LBWN in Little NavMap

The flight task scenario is executed in X-Plane v.12 flight simulator, [3]. A flight plan, Fig. 2 was created in advance in Little NavMap, [4] and uploaded to GNS 530/430 GPS receivers which can be found on aircraft Cessna 172 SkyHawk, [5] dashboard. The examined candidate is told to follow a standard terminal arrival route to Varna airport, LBWN and land using ILS-Y approach at RWY 09. The aircraft flies along the entire flight plan automatically. The candidate is exclusively focused on adjusting throttle and mixture controls to keep EGT (exhaust gas temperature) and engine RPM (revolutions per minute) within acceptable limits. Not long before touchdown, the candidate disengages the autopilot by pressing a dedicated switch on the flight yoke and lands manually. It takes the applicant about eight minutes to complete the task.

During flight task fulfilment, a desktop-based eye tracker stores gaze fixations number and duration, Fig. 3 within zones of interest defined beforehand. Saccadic pupil movement is not taken into account. The eye tracker used is GazePoint GP3 HD, Fig. 3. Data log rate is 150 Hz. The GazePoint Analysis UX raw data recording and processing software computes total Viewed Time in seconds and per cent at each zone of interest. Upon flight plan completion, the results are directed to the Orange data mining tool for evaluating the applicant's performance.

Alongside fixation distribution within the screen, a time plot is created to portray and analyze gaze temporal dynamics across four zones of interest. The Circle Diagram created in this manner closely resembles the static "time plot of the gaze data" suggested by Räihä et al., [6]. In the diagram, fixation ordering pattern (if any) is of primary interest.

Fig. 3. GazePoint GP3 HD desktop-based eye tracker, pulse rate sensor, and self-engagement report tool

The flight simulator display has been pre-divided into four areas of interest as shown in Fig. 4:

- Primary flight instruments including air speed indicator, attitude indicator, barometric altimeter, turn coordinator, heading indicator, variometer, propeller RPM and Hobbs meter.
- Secondary flight instruments including VOR1 / ILS gauge, VOR2 gauge, automatic direction finder (ADF) gauge, audio switching panel, GNS 530/430 GPS receivers, transponder, autopilot. The ILS receiver is set to CAT I IWN frequency. The ADF receiver, while not assigned to a specific zone of interest, has its frequency set to Devnya DWN NDB.
- Tertiary flight instruments including chronometer, fuel gauge, exhaust gas temperature and fuel flow, oil temperature and pressure, vacuum pressure and battery ammeter.
- The environment visible through windshield.

The pilot's head spontaneous motion lies within acceptable limits which is why it can be disregarded.

Fig. 4. Cessna 172 cockpit overlaid with zones of interest and dynamic heatmap in X-Plane 12

During training phase, an experienced pilot fulfills the flight assignment and achieves an outstanding score. The pilot is considered etalon or prototypic. Data for the machine model training is generated by adding white Gaussian noise to the original dataset by function awgn in GNU Octave, [7]. The signal-to-noise ratio varies based on the required pilot's skills. A good pilot is thought to stray less from the original dataset, whereas a poor one diverges significantly. In this way, data is generated for applicants with different level of experience. Whenever an applicant decides to take the exam, the machine model makes a prediction and reports whether the applicant passed or failed the test. Miscalculations are highly unlikely. It depends on how well the classifier is trained.

Results

In Fig. 5, confusion matrices pertained to three used classifiers are shown.

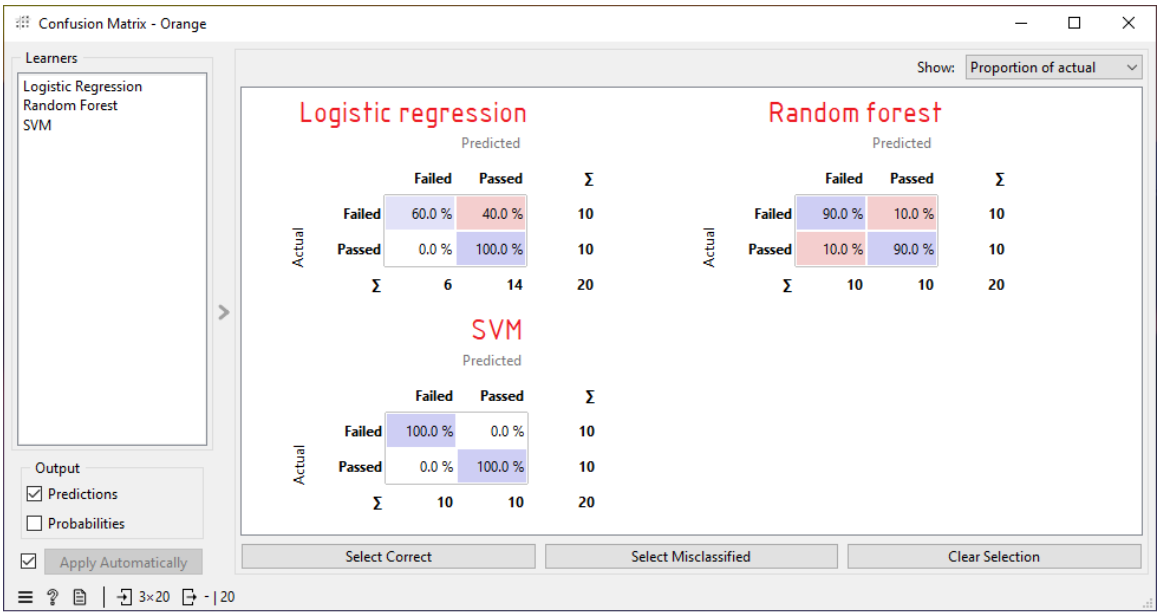


Fig. 5. Confusion matrices related to used classifiers

Upon double clicking on Test and Score widget, following results are revealed.

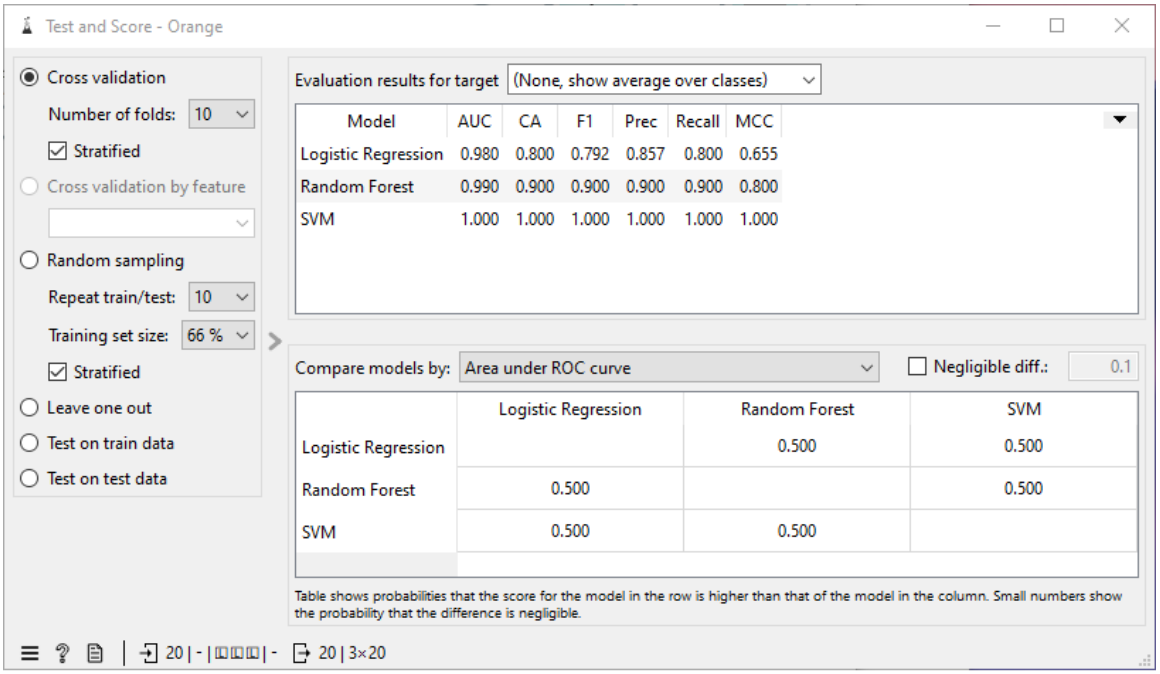


Fig. 6. Test and Score widget contents

In Fig. 7, the applicant's results are displayed.

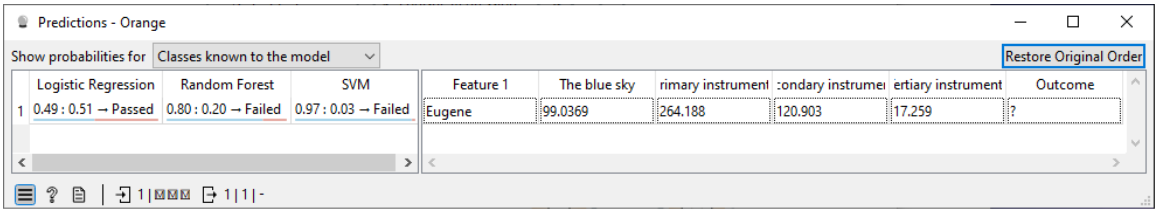


Fig. 7. The applicant's results

In Fig. 8, a circle diagram is shown depicting temporal dynamics of fixations. In the right-hand side, the adopted formalism is briefly explained. The ordinate represents four zones of interest whilst the abscissa indicates time, s.

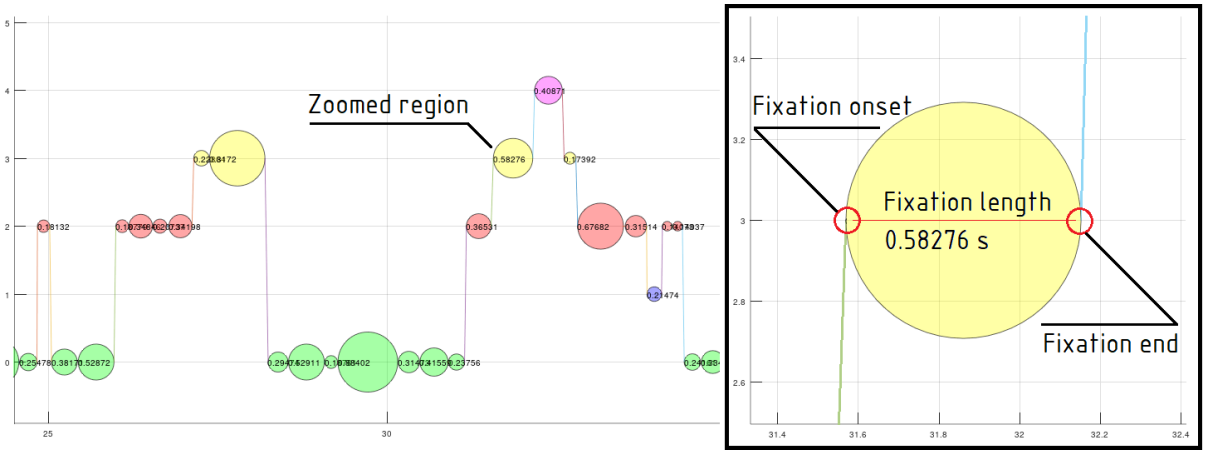


Fig. 8. A fragment of circle diagram

Discussion

According to Fig. 5 (confusion matrices) the Logistic Regression classifier exhibits the poorest performance in the present study compared to the other classifiers. On the other hand, all predictions made by Support Vector Machine are correct. Because of little to no experience, the applicant is expected to fail the test and this is what really occurs according to Random Forest and Support Vector Machine classifiers Fig. 7.

Accuracy metric indicates the number of correct predictions out of all made. **Precision** metric refers to the count of true positive instances among all those identified as positive. **Recall** metric provides insight into whether the classification model finds all instances of the positive class. When precision increases, recall diminishes, and the opposite holds true as well. **F1-score** is the harmonic mean of both. This indicator reaches its highest value when the precision equals the recall. In this regard, the Support vector Machine performs best according to metrics shown in Fig. 6.

The optimal machine learning algorithm for binary classification relies on several factors including the dataset nature and size, interpretability needs, and available computational resources. Choosing the best algorithm for evaluating applicants involves:

- Experimenting with multiple models via cross-validation;
- Considering an interpretability versus accuracy trade-off;
- Tuning hyperparameters to optimize performance.

Overall, a trade-off between accuracy and robustness for binary classification tasks is commonly sought.

In current research, GNU Octave [7] is used to process raw data and draw circle diagram.

References:

1. Bo Fu, P. Gatsby, A. Soriano, K. Chu, and N. Guardado, Towards Intelligent Flight Deck – A Preliminary Study of Applied Eye Tracking in the Predictions of Pilot Success and Failure During Simulated Flight Takeoff, Proceedings of the First International Workshop on Designing and Building Hybrid Human-AI Systems co-located with 17th International Conference on Advanced Visual Interfaces AVI 2024, Arenzano (Genoa), Italy, June 3rd, 2024 https://ceur-ws.org/Vol-3701/
2. https://orangedatamining.com/
3. https://www.x-plane.com/
4. https://albar965.github.io/
5. https://www.x-plane.com/manuals/C172_Pilot_Operating_Manual.pdf
6. Räihä, K. J., Aula, A., Majaranta, P., Rantala, H., & Koivunen, K., 2005. “Static visualization of temporal eye-tracking data. In IFIP Conference on Human-Computer Interaction (pp. 946–949). Springer, Berlin, Heidelberg https://www.researchgate.net/publication/221054730_Static_Visualization_of_Temporal_Eye-Tracking_Data
7. https://octave.org/

МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА МОДЕЛА НА ТИПОВ ПОЛЕТ НА ХЕЛИКОПТЕР AS532AL COUGAR С ВЪНШНО ПОЖАРОГАСИТЕЛНО УСТРОЙСТВО ОТ ТИПА "BAMBI BUCKET 4453" ЗА ГАСЕНЕ НА ПОЖАРИ

Николай Загорски

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

Ключови думи: *хеликоптер, външно пожарогасително устройство, гасене на пожари*

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".*

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, fire fighting*

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.*

Въведение

Математическият модел на полета на хеликоптер за гасене на пожари с външно пожарогасително устройство, закачено на кабел, трябва да отговаря на някои от следните условия [1, 2]:

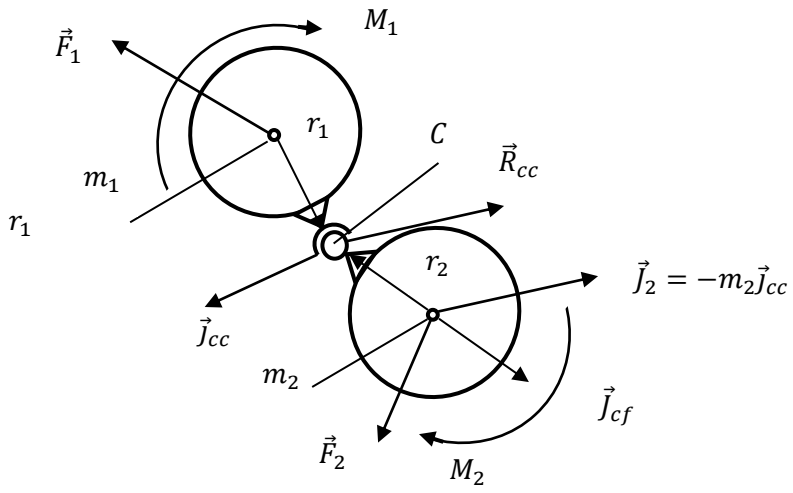
- да описва движението на външното устройство в 3-D пространството при големи премествания;
- да позволява създаването на модел на външното пожарогасително устройство с всички известни аеродинамични, геометрични, масови и инерционни характеристики;
- да отчита всички кръстосани връзки между степените на свобода на външното устройство;
- да отчита всички сили, действащи на устройството, включително инерционните сили;
- да позволява да се определят аеродинамичните сили и моменти, които действат на външното пожарогасително устройство в полет, при всички възможни съчетания на ъгъла на атака в диапазона $\alpha = (-180°) - (+180°)$ и на ъгъла на плъзгане $\beta = (-180°) - (+180°)$;
- да отчита силите, които създава хеликоптерът в полет, и тяхното влияние върху външното пожарогасително устройство, като при това в общия случай, точката за закрепване на

централния кабел към хеликоптера не трябва да съвпада с центъра на масите на хеликоптера, а точката за закрепване на кабела към външното устройство не трябва да съвпада с центъра на масите на самото устройство;

- да отчита еластичността на централния кабел за закрепване на външното пожарогасително устройство към хеликоптера;
- да отчита въздействието на неламинарния поток, най-малко във вид на единичен срез на вятъра във всяко направление;
- да позволява създаването на специализиран софтуер за работа със стандартен персонален компютър във вид на отделен модул, който да работи съвместно със специализиран софтуер, описващ динамиката на полета на хеликоптера.

1. Математически модел на динамиката на поведение на две тела, свързани помежду си с идеален сферичен шарнир

На фиг. 1 е представена динамика на поведението на две абсолютно твърди тела, свързати помежду си с идеален сферичен шарнир. На схемата тяло № 1 (m_1) е носещо тяло, а тяло № 2 (m_2) се намира под тяло № 1 (спрямо Земята) и е закачено тяло.



Фиг. 1. Схема на взаимодействие на две абсолютно твърди тела, свързани помежду си с идеален сферичен шарнир

По принцип, за съставяне на уравненията на движение на показаната система от две тела може да се използват методите на теоретичната механика и да се съставят уравнения на Лагранж от 2-ри ред. Но решаването на такива уравнения ще бъде твърде тежко, обемни и трудоемко още повече, че разглежданата система притежава голям брой степени на свобода, както и изисква описание на движението в големи премествания. Поради тези причини, за решаването на задачата е по-рационално да се използва принципът на Д'Аламбер [3, 4].

Доколкото двете тела са свързани помежду си чрез идеален сферичен шарнир, то взаимодействието между тях може да се опише само с една сила- $\vec{R}_{cc}$, приложена в шарнира. В резултат на това, уравненията за движение на системата от тези две тела може да се запише в следния вид, като силата $\vec{R}_{cc}$ се представи като външна сила за всяко от телата:

- уравнения на силите:

$$(1) \qquad \begin{cases} m_1 \frac{d\vec{V}_1}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{R}_{cc}; \\ m_2 \frac{d\vec{V}_2}{dt} = \vec{F}_2 - \vec{R}_{cc}; \end{cases}$$

- уравнения на моментите:

$$(2) \qquad \begin{cases} \frac{d\vec{K}_1}{dt} = \vec{M}_1 + \vec{r}_1 \mathrm{x}\, \vec{R}_{cc}; \\ \frac{d\vec{K}_2}{dt} = \vec{M}_2 + \vec{r}_2 \mathrm{x}\, \vec{R}_{cc}, \end{cases}$$

където: m_1 и m_2 са масите на двете тела;

$\vec{V}_1$ и $\vec{V}_2$ са скоростите на центъра на масите на двете тела;
$\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ са външните сили, действащи на телата;
$\vec{K}_1$ и $\vec{K}_2$ са кинетичните моменти на телата;
$\vec{M}_1$ и $\vec{M}_2$ са главните моменти от външните сили, действащи на телата;
$\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ са радиус-векторите на т.*C* (идеалния сферичен шарнир), спрямо центъра на масите на двете тела.

Движението на двете тела ще бъде разгледано като сложно движение, състоящо се от постъпателно и от относително движения. За тяло № 1 (на фиг. 1) за постъпателно движение на тялото ще се счита постъпателното движение на неговия център на масите спрямо някаква инерциална система за отчитане. За относително движение на тялото ще се счита въртеливото движение около неговия център на масите. По такъв начин, движението на тяло № 1 ще се описва със същите уравнения, които участват в системите уравнения (1) и (2).

За постъпателно движение на тяло № 2 ще се счита постъпателното движение на т.*C*, която представлява обща точка и за двете тела. За относително движение на тяло № 2 ще се счита въртеливото му движение около т.*C*. Трябва да се отбележи, че постъпателното движение на т.*C* може да бъде определено само с използването на т.*C* може да бъде определено само с използване на уравненията за движения на тяло № 1. Въртеливото движение на тяло № 2 може да бъде представено като движение на тяло около условно неподвижна точка *C*. Това въртене ще се извършва под действие на външна активна сила $\vec{F}_2$ и инерционната сила $\vec{J}_2$. Инерционната сила $\vec{J}_2$ ще възниква при ускорено преместване на точката на свързване на двете тела (т. *C*) и ще бъде приложена в центъра на масите на тяло № 2. Трябва да се отбележи, че Кориолисовата инерционна сила при този подход ще бъде равна на нула, защото тяло № 2 има постъпателно движение [5].

Силата $\vec{R}_{cc}$ няма да оказва влияние на въртеливото движение на тяло № 2, тъй като е приложена в точката на въртене и не създава момент спрямо тази точка (в този случай, рамото на сила $\vec{R}_{cc}$ е равно на нула). Размерът и посоката на сила $\vec{R}_{cc}$ ще зависят от силите, които действат на тяло № 2, сред които е и центробежната сила $\vec{J}_{cf}$, която възниква от въртеливото движение на тялото около точка *C* (фиг. 1). По такъв начин, системата уравнения за движението на тази система от две тела във векторна форма може да бъде записана по следния начин:

$$(3) \quad \begin{cases} m_1 \frac{d\vec{V}_1}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{R}_{cc}; \\ \frac{d\vec{K}_1}{dt} = \vec{M}_1 + \vec{r}_1 \mathrm{x}\, \vec{R}_{cc}; \\ \vec{R}_{cc} = \vec{F}_2 + \vec{J}_2 + \vec{J}_{cf}; \\ \frac{d\vec{K}_{2b}}{dt} = \vec{M}_2 + \vec{r}_2 \mathrm{x}\, \vec{F}_2 + \vec{r}_2 \mathrm{x}\, \vec{J}_2, \end{cases}$$

където $\vec{K}_{2b}$ е кинетичният момент на тяло № 2 спрямо точка *C*.

Така описаната система от две тела, свързани помежду си с идеален сферичен шарнир, могат да бъдат разглеждани като елементарна клетка за създаване на математически модел на система от повече от две тела, последователно свързани едно с други в някаква верига. Теоретично броят на елементите (телата) във веригата може да бъде неограничен. В същото време трябва да се отбележи, че могат да възникнат проблеми със създаването на устойчива диференциална система за числено интегриране. Въпреки това, този подход е подходящ и позволява да бъдат създавани модели за сложни движения на меката връзка за закачване на външното устройство при големи премествания. Например, след скъсване на централния кабел (меката връзка), при полет на хеликоптера с празно външно пожарогасително устройство от типа „Bambi Bucket“ и др.

2. Основни изисквания и допускания при съставяне на математически модел за полет на хеликоптер с външно устройство

За да бъде приложен описаният по-горе метод за определяне на движението на хеликоптера и на външното устройство като две абсолютно твърди тела, като начало е необходимо да бъдат въведени някои ограничения и да бъдат направени някои допускания:

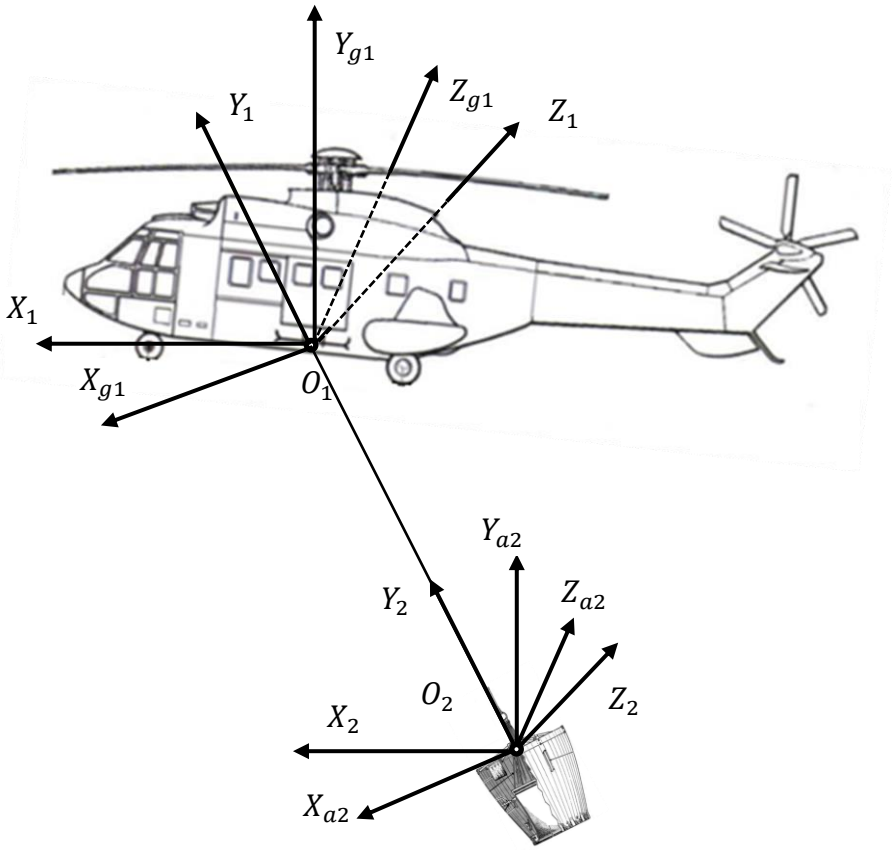
- ъгловите премествания на централния кабел (меката връзка за закачване на външното устройство към хеликоптера) спрямо самото външно устройство са незначителни. В

този смисъл може да се счита, че кабелът и външното устройство представляват едно общо тяло „Кабел-външно устройство“;
- хеликоптерът и външното устройство са свързани помежду си с идеален сферичен шарнир, разположен в точката на закрепване на кабела към хеликоптера;
- аеродинамичните характеристики на външното устройство се считат за известни и постоянни, т.е. не се отчитат нестационарните аеродинамични ефекти;
- не се отчита влиянието на индуктивния поток от основното витло върху външното устройство, защото преимуществено се разглежда хоризонтален полет на хеликоптера с външно пожарогасително устройство от типа „Bambi Bucket“;
- не се отчита влиянието на постоянна атмосферна турбулентност върху хеликоптера и външното устройство;
- приема се, че централния кабел притежава еластичност на опън, но се счита за абсолютно твърд при огъване, като винаги остава праволинеен.

За да бъде описана динамиката на поведение на външното пожарогасително устройство при полет на хеликоптера е необходимо да бъдат въведени допълнителни координатни системи.

3. Координатни системи на хеликоптера, на кабела за закачване и на външното устройство при съставяне на математически модел за полет на хеликоптер с външно устройство

На фиг. 2 са представени следните координатни системи на хеликоптера, на кабела за закачване на външното устройство към хеликоптера и на самото външно устройство:
- нормална координатна система на хеликоптера: $OX_gY_gZ_g$;
- нормална координатна система в точката на закачване на външното устройство към хеликоптера: $O_1X_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$;
- свързана координатна система на кабела: $O_1X_1Y_1Z_1$;
- свързана координатна система на външното устройство: $O_2X_2Y_2Z_2$;
- скоростна координатна система на външното устройство: $O_2X_{a2}Y_{a2}Z_{a2}$.



Фиг. 2. Координатни системи на хеликоптера, на централния кабел и на външното пожарогасително устройство

По-горе беше направено допускането, че централният кабел е закрепен в точката на закачване към хеликоптера чрез идеален сферичен шарнир [6]. Поради тази причина, положението на централния кабел (положението на свързаната координатна система на кабела $O_1X_1Y_1Z_1$) спрямо нормалната координатна система в точката на закачване $O_1X_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$. Може да бъде описана по същия начин, както при описване на взаимното положение на координатните системи на хеликоптера $OXYZ$ и $OX_gY_gZ_g$, т.е. с помощта на ъглите на рискание ψ_1, на тангаж ν_1 и на крен γ_1.

4. Уравнения на динамика на поведение на външното пожарогасително устройство

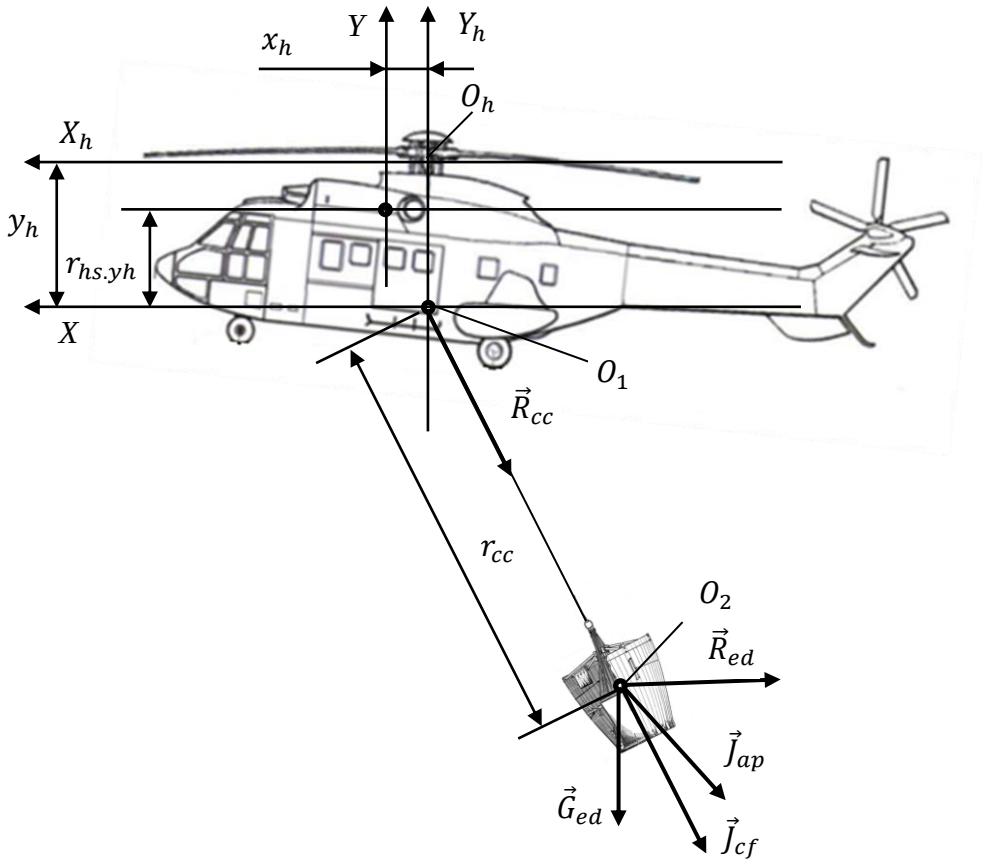
В полет на хеликоптера върху външното устройство действат различни сили- сила на тежестта, аеродинамична сила, инерционна сила, което предизвиква сила на опън $\vec{R}_{cc}$ в кабела за закачване на външното устройство. И тъй като в общия случай точката на закачване на кабела към хеликоптера не съвпада с центъра на масите на хеликоптера, то силата на опън $\vec{R}_{cc}$ в кабела ще създава момент $\vec{M}_{cc}$ спрямо центъра на масите на хеликоптера (т. O на фиг. 3).

В тази връзка уравнението на силите и на моментите, които действат на хеликоптера в полет [7], трябва да бъдат допълнени, съответно, със силата на опън в кабела $\vec{R}_{cc}$ и с момента от нея $\vec{M}_{cc}$:

(4) $$\vec{F} = \vec{R}_{MP} + \vec{T}_{TP} + \vec{R}_A + \vec{G} + \vec{R}_{cc},$$

(5) $$\vec{M} = \vec{M}_{MP} + \vec{M}_{TP} + \vec{M}_A + \vec{M}_{cc}.$$

За да бъде определена стойността на силата на опън в централния кабел $\vec{R}_{cc}$ е необходимо да се определи проекцията на равнодействащата сила $\vec{R}_{ed}$ на всички сили, които действат на външното устройство по оста на кабела.



Фиг. 3. Схема за определяне на силата в централния кабел на външното пожарогасително устройство и на момента от нея

Равнодействащата сила $\vec{R}_{ed}$ представлява следната векторна сума:

(6) $\vec{R}_{ed} = \vec{G}_{ed} + \vec{R}_{A.ed} + \vec{J}_{ap} + \vec{J}_{cf}$,

където: $\vec{G}_{ed}$ е силата на тежестта на външното устройство;

$\vec{R}_{A.ed}$ е равнодействащата на всички аеродинамични сили, действащи на външното устройство;

$\vec{J}_{ap}$ е инерционната сила, възникваща при ускореното движение на точката за закрепване на външното устройство към хеликоптера;

$\vec{J}_{cf}$ е инерционната центробежна сила, възникваща от залюляването на външното устройство.

Тъй като свързаната координатна система на централния кабел и на външното устройство (съответно, $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$) имат твърда връзка помежду си, то е по-удобно при описание на динамика на поведение на системата „Централен кабел–външно устройство“ за свързана координатна система да бъде избрана координатната система $O_1X_1Y_1Z_1$. В този случай, движението на външното устройство на кабела спрямо стартовата координатна система може да се представи като сложно движение, което се състои от движение на свързаната координатна система $O_1X_1Y_1Z_1$ спрямо нормалната координатна система $O_1X_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$, която на свой ред се движи спрямо стартовата координатна система $O_{st}X_{st}Y_{st}Z_{st}$. В теоретичната механика е прието първият тип движение да се нарича относително, а вторият-постъпателно (преносно).

Трябва да се отбележи, че движението на системата „Централен кабел–Външно устройство“ спрямо нормалната координатна система $O_1X_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$ (относително движение) може да се разглежда като движение на тела, които имат една условна неподвижна точка- точката на закачване (на кабела към хеликоптера). По своя характер това е въртеливо движение. То е аналогично на движението на самия хеликоптер спрямо центъра на масите му и ще се поражда от въздействието на момента $\vec{M}_{ed}$, който представлява сума на моментите от силите, които действат на външното устройство, спрямо точката на закачване:

(7) $\vec{M}_{ed} = \vec{M}_{G.ed} + \vec{M}_{A.ed} + \vec{M}_{ap}$,

където: $\vec{M}_{G.ed}$ е момент от силата на тежестта на външното устройство;

$\vec{M}_{A.ed}$ е момент от аеродинамичната сила на външното устройство;

$\vec{M}_{ap}$ е момент от силите, възникващи от ускореното преместване на точката за закачване на кабела към хеликоптера.

Заключение

Създаването на аналитични математически модели, описващи поведението в полет за гасене на пожари на хеликоптер с външно пожарогасително устройство от типа “Bambi Bucket 4453”, дава възможност за повишаване на авиационната безопасност при изпълнение на този тип изключително рискова дейност, не само при изпълнението на типов полет, но и при изследване на влиянието на случайни въздействия на пориви на вятъра в полет.

Литература:

1. Добронравов, В. В., Н. Н. Никитин, А. Л. Дворников, Курс теоретической механики: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. М. Высшая школа. 1974. 528 стр.
2. Stuckey, R.A., Mathematical Modelling of Helicopter Slung-Load Systems, Air Operations Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTOTR1257, 2002
3. Bisgaard, M., Bendtsen, J.D., La Cour-Harbo, A., Modelling of Generic Slung Load System. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit 21 − 24 August 2006, Keystone, Colorado
4. Cicolani, L.S. and Kanning, G., Equations of Motion of Slung-Load Systems, Including Multilift Systems, NASA, 1992, NASA-TP-3280
5. Загорски, Н., Изследване на колебанията на физично махало с подвижна точка на окачване. XI-та международна научна конференция „Научните изследвания, технологии и иновации – основа за изграждане на нови отбранителни способности”, 2-3 юни 2022 г., гр. Пловдив, Институт по отбрана - МО,Сборник доклади, стр. I-74 - I-81. ISSN 1312-2916
6. Загорски, Н. Изследване на влиянието на параметрите на външния товар на условията за равновесието му в полет. XI-та международна научна конференция „Научните изследвания, технологии и иновации – основа за изграждане на нови отбранителни способности”, 2-3 юни 2022 г., гр. Пловдив, Институт по отбрана - МО,Сборник доклади, стр. I-82 – I-89. ISSN 1312-2916
7. Жуков, А. Я., В. И. Егоров, А. Л. Ермаков [и др.], Динамика полета транспортных летательных аппаратов, учебник для вузов, под ред. А. Я. Жукова. М. Транспорт. 1996. 326 стр.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИЧНАТА УСТОЙЧИВОСТ НА ВЪНШНО ПОЖАРОГАСИТЕЛНО УСТРОЙСТВО ОТ ТИПА "BAMBI BUCKET BB4453", ЗАКАЧЕНО ПОД ХЕЛИКОПТЕР AS532AL COUGAR В ПОЛЕТ ЗА ГАСЕНЕ НА ПОЖАРИ

Николай Загорски

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

Ключови думи: *хеликоптер, външно пожарогасително устройство, динамична устойчивост*

Резюме: *В материала са изложени теоретични изследвания на динамичната устойчивост на външно пожарогасително устройство от типа "Bambi Bucket BB4453", закачено под хеликоптер AS532AL Cougar в полет за гасене на пожари. Представени са зависимости за характеристиките на динамичната устойчивост на външното устройство от скоростта на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптера и от параметрите на пожарогасителното устройство.*

DYNAMIC STABILITY STUDY OF AN EXTERNAL FIRE EXTINGUISHING DEVICE OF THE "BAMBI BUCKET BB4453" TYPE, ATTACHED TO AN AS532AL COUGAR HELICOPTER DURING A FIREFIGHTING FLIGHT

Nikolay Zagorski

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

Keywords: *helicopter, external fire extinguishing device, dynamic stability*

Abstract: *The material presents theoretical studies of the dynamic stability of an external fire extinguishing device of the "Bambi Bucket BB4453" type, attached to an AS532AL Cougar helicopter during a firefighting flight. Dependencies of the characteristics of the dynamic stability of the external device on the speed of a steady horizontal straight flight of the helicopter and on the parameters of the fire extinguishing device are presented.*

Въведение

Транспортирането с хеликоптер на външни закачени товари отдавна е доказало своята ефективност в авиационната практика. По аналогичен начин в цял свят се прилага гасене на пожари с различни типове хеликоптери и различни типове външни пожарогасителни устройство от типа "Bambi Bucket" ("BB4453", "BB5566", "BBHL5000"и др.), производство на SEI Industries LTD, Канада [1]. В Република България в операции за гасене на пожари се използва един хеликоптер Ми-17 и няколко хеликоптера AS532AL Cougar с външно пожаро-гасително устройство "BB4453" с вместимост от 2 000 l. Но в същото време трябва да се отбележи, че прогнозирането на поведението на външното пожарогасително устройство при динамична промяна на параметрите на полета на хеликоптери на околната среда се извършва преди всичко на основата на опита на отделните летателни екипажи. Това е свързано с обстоятелството, че динамиката на поведение на външното пожарогасително устройство в полет на хеликоптера за гасене на пожари все още не е изследвано теоретично достатъчно задълбочено.

В настоящия материал се разглеждат теоретични подходи за изследване на динамиката на външното пожарогасително устройство в полет на хеликоптер AS532AL Cougar в полет за

гасене на пожари. Дадени са и някои от резултати от изследване на влиянието на параметрите на полета и на устройството върху характеристиките на динамичната устойчивост на “ВВ4453”в установен хоризонтален праволинеен полет.

1. Надлъжна устойчивост на външното пожарогасително устройство

При полет на хеликоптер за гасене на пожари се предполага, че ще съществува някакво постъпателно движение на външното пожарогасително устройство в хоризонталната равнина с определена скорост. В този смисъл, трябва да бъде изследвано влиянието на параметрите на такъв полет на хеликоптера и на параметрите на устройството, което в значителна степен определя безопасността на конкретния полет и на авиационната безопасност като цяло [2].

В условията на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптер за гасене на пожар, външното пожарогасително устройство може да бъде изведено от положение на равновесие, например, при въздействие на порив (срез) на вятъра [3, 4]. Първоначално да разгледаме вертикален възходящ порив на вятъра. Международната организация за гражданска авиация – ICAO, е приела, че за порив на вятъра ще се счита всяка поява, или съществено изменение на посоката на вятъра, което продължава не повече от 28 s [5]. Да се възползваме от профила на порива, приведен в [3], за определяне на претоварванията от неспокоен въздух:

(1) $$W_{y.g}(s) = \frac{W_{y.g}}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi s}{H}\right)\right],$$

където: $W_{y.g}$ е максимална скорост на вертикалния порив на вятъра;

s е разстоянието („дълбочина“) на проникване на порива;

H е дължината на участъка за нарастване на порива (разстоянието от началото на порива до неговата максимална стойност, измерена по посока на траекторията на полета).

При провеждане на теоретичните изследвания е по-удобно профилът на порива на вятъра да бъде представен като зависимост на скоростта на порива във функция от времето:

(2) $$W_{y.g}(t) = 0,$$

ако $t < t_{s.gw}$,

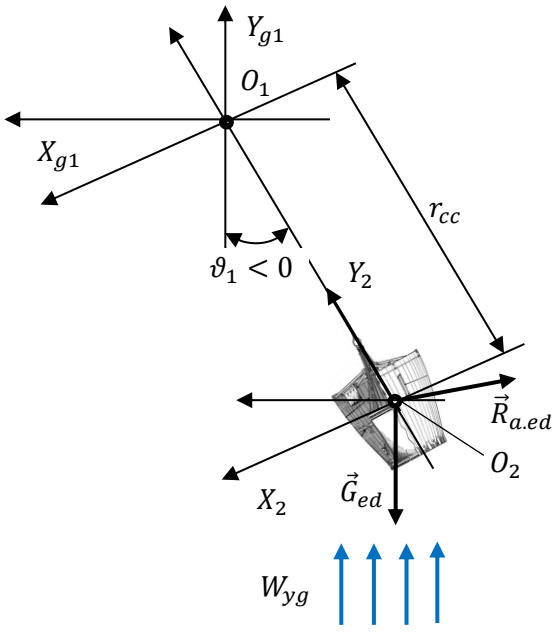
или $t > t_{s.gw} + \frac{2H}{V_{hf}}$;

(3) $$W_{y.g}(t) = \frac{W_{y.g}}{2}\left[1 - \cos\frac{\pi V_{hf}(t - t_{s.gw})}{H}\right],$$

където: t е текущото време;

$t_{s.gw}$ е времето на начало на порива на вятъра;

V_{hf} е скоростта на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптера.



Фиг. 1. Схема на въздействие на вертикален
възходящ порив на вятър върху външно пожарогасително устройство

За провеждане на теоретичните изследвания са бяха приети следните параметри на порива на вятъра, съгласно таблиците в [5]: $H = 40\ m$; $W_{y.g} = 20\ m/s$.

2. Изследване на влиянието на параметрите на полета и на външното устройство за динамичната устойчивост на външното пожарогасително устройството

В случая най-важна е задачата за определяне на влиянието на параметрите на външното пожарогасително устройство и параметрите на полета на хеликоптера върху такива характеристики на динамичната устойчивост, като времето на преходния процес t_{tp}, абсолютното отклонение $A_{th.max}$, на ъгъла на тангаж на централния кабел ϑ_1 на външното устройство, продължителността на един цикъл от колебания T_f.

За решаване на така определените задачи бяха проведени следните теоретични изследвания, представени на фиг. 1. Точката O_1, в която се закачва към хеликоптера централният кабел на външното устройство се движи хоризонтално с постоянна скорост V_{hf}. Приемаме, че O_1 достига тази скорост мигновено, т.е. в момент от време $t = 0$, тя вече има скорост V_{hf}. След някакво време ъгълът на отклонение ϑ_1 на централния кабел от вертикално положение (ъгъл на тангаж на кабела) ще се стабилизира. След това в зададен момент от време възниква контакт с вертикален възходящ порив на вятъра. В резултат ще се измени ъгълът на отклонение на централния кабел, като започва колебателен процес, който ще затихне след определено време. След провеждане на редица такива изчислителни експерименти за различни скорости на полета V_{hf} и параметри на външното пожаро-гасително устройство е определено тяхното влияние на характеристиките на колебателния процес.

Ако височината на полета се приеме за постоянна, т.е. изпълнява се хоризонтален праволинеен полет, то към изследваните параметри ще се отнася само скоростта V_{hf}. В качеството на изследвани параметри на външното устройство ще бъдат разгледани балистичният коефициент c_a, дължината на централния кабел r_{cc} и аеродинамичното качество K_{ed} на устройството.

Балистичен коефициент на външното пожарогасително устройство се нарича съотношението [6, 7]:

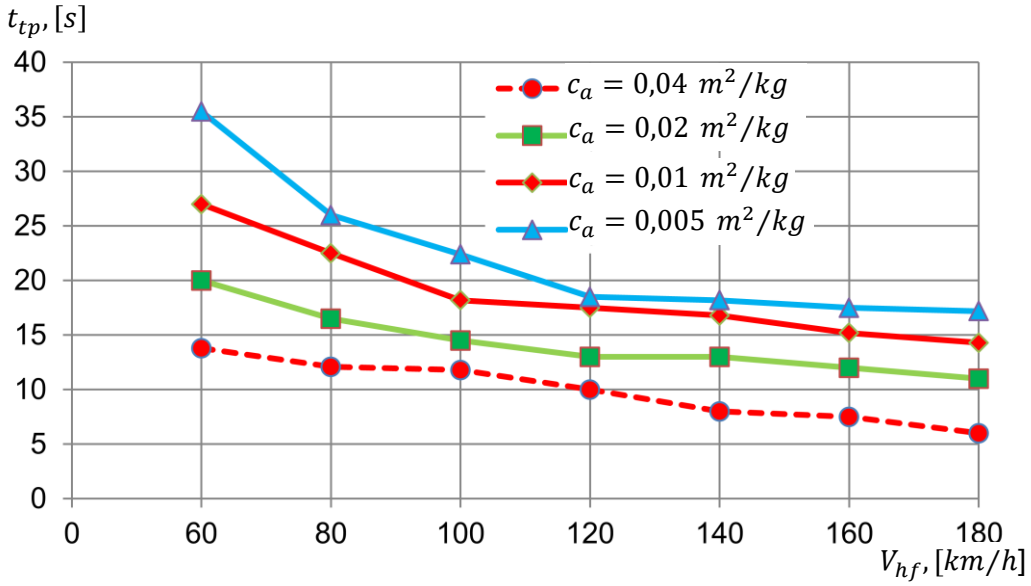
(4) $$c_a = \frac{c_{x.a} S_{ed}}{m_{ed}},$$

където: $c_{x.a}$ е коефициент на силата на челно съпротивление на външното устройство;

S_{ed} е характерна площ на външното устройство;

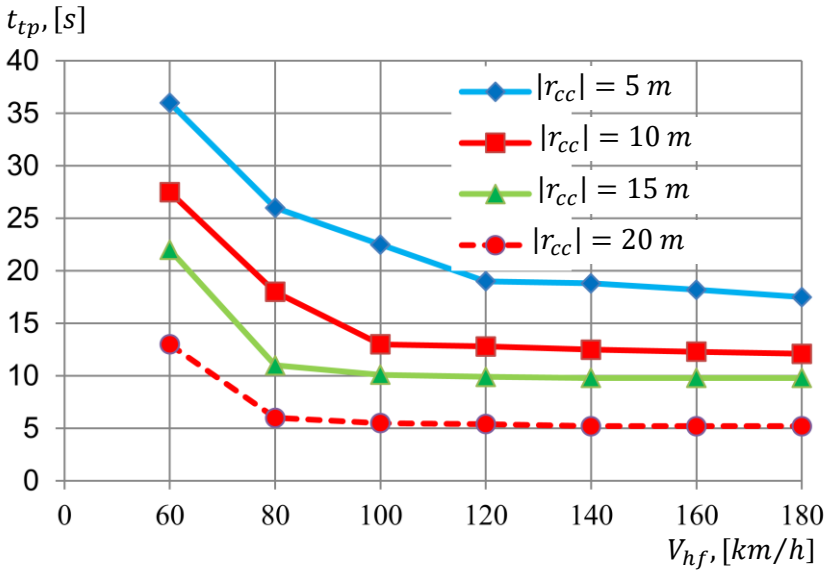
m_{ed} е масата на външното пожарогасително устройство.

При провеждане на теоретичните изследвания и изчисления беше прието, че c_a и K_{ed} се изменят слабо в процеса на колебателно движение, което се потвърждава от авиационната практика на летателните екипажи на хеликоптери.



Фиг. 2. Графики за влиянието на балистичния коефициент на външното пожарогасително устройство и на скоростта на полета на хеликоптера за времето на преходния процес след въздействие на вертикален порив на вятъра

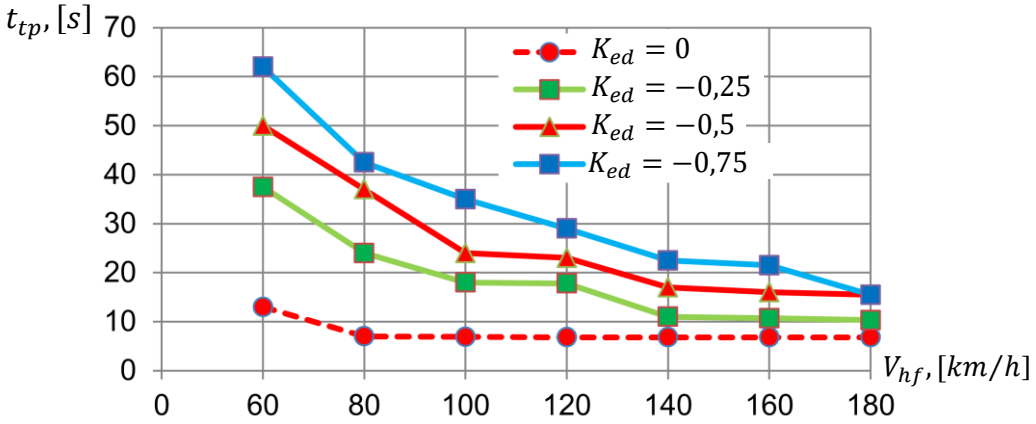
На фиг. 2 са представени резултатите от изчисленията по определяне на влиянието на балистичния коефициент c_a на външното пожарогасително устройство за времето на преходния процес t_{tp} след въздействие на порива на вятъра. При това беше прието, че аеродинамичното качество на външното устройство $K_{ed} = 0$, а дължината на централния кабел за закачване на устройството към хеликоптера е $r_{cc} = 10\ m$. Анализът на получените графики показва, че с увеличаване на скоростта на хоризонталния полет и при увеличаване на балистичния коефициент на външното устройство намалява времето на преходния процес.



Фиг. 3. Графики за влиянието на дължината на централния кабел на външното пожарогасително устройство и на скоростта на полета на хеликоптера за времето на преходния процес след въздействие на вертикален срѐз на вятъра при $\mathrm{K_{ed}} = 0$ и $\mathrm{c_a} = 0{,}0025\ \mathrm{m^2/kg}$

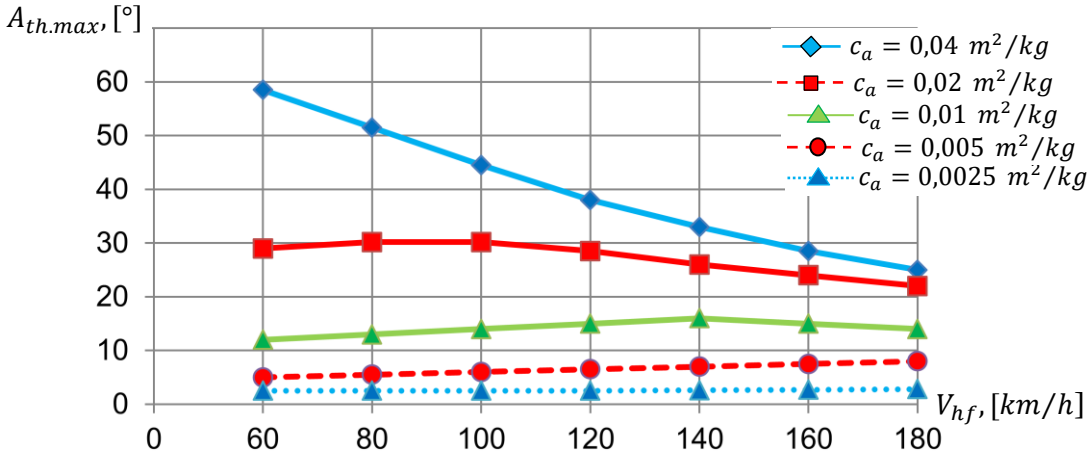
На фиг. 3 са представени графики на времето на преходния процес във функция от дължината на централния кабел за закачване на външното пожарогасително устройство към хеликоптера. Анализът на тези графики показва, че при увеличаване на дължината на кабела времето на преходния процес се съкращава.

Проведените изследвания също така показаха, че при увеличаване на стойностите на балистичния коефициент намалява влиянието на дължината на централния кабел за времето на преходния процес, а при увеличаване на дължината на кабела намалява влиянието на балистичния коефициент. При това при равни други условия, изменението на балистичния коефициент на външното пожарогасително устройство в по-голяма степен влияе на времето на преходния процес, отколкото изменението на дължината на кабела.



Фиг. 4. Графики за влиянието на аеродинамичното качество на външното пожарогасително устройство и на скоростта на полета на хеликоптера за времето на преходния процес след въздействие на вертикален порив на вятъра при $\mathrm{c_a} = 0{,}0025\ \mathrm{m^2/kg}$

Влиянието на аеродинамичното качество на външното пожарогасително устройство K_{ed} за времето на преходния процес t_{tp} също така е свързано със стойността на балистичния коефициент c_a на устройството. При големи стойности на балистичния коефициент c_a аеродинамичното качество K_{ed} на външното устройство оказва слабо влияние на времето на преходния процес. При малки стойности на балистичния коефициент съществено нараства влиянието на аеродинамичното качество на външното устройство на времето на преходния процес, което е представено на фиг. 4.



Фиг. 5. Графики за абсолютното максимално отклонение във функция от скоростта на полета на хеликоптера при различни стойности на балистичния коефициент на външното устройство при дължина на централния кабел $|r_{cc}| = 7$ m и аеродинамично качество на външното устройство $K_{ed} = 0$

Да изследваме влиянието на параметрите на полета и на външното пожарогасително устройство на абсолютното отклонение $A_{th.max}$ при въздействие на възходящ порив на вятъра. Изчисленията показват, че увеличаването на балистичния коефициент c_a на външното устройство води до увеличаване на абсолютното отклонение $A_{th.max}$ на ъгъла на тангаж на централния кабел ϑ_1, което е представено на фиг. 5. При това, увеличаването на скоростта на полета на хеликоптера при големи стойности на балистичния коефициент води до съществено намаляване на абсолютното отклонение $A_{th.max}$. От друга страна, при малки стойности на балистичния коефициент c_a на външното устройство, скоростта на полета на хеликоптера оказва слабо влияние на абсолютното отклонение $A_{th.max}$, а увеличаването на скоростта води до увеличаването на абсолютното отклонение $A_{th.max}$. При средни стойности на балистичния коефициент съществуват максимуми на отклонението във функция от скоростите на полета, които се преместват в посока на големите скорости на полета при намаляване на балистичния коефициент на устройството. По такъв начин, при средни стойности на балистичния коефициент $c_a \approx 0{,}01\ m^2/kg$ съществува скорост на полета на хеликоптера, при която абсолютното отклонение ще бъде максимално - $A_{th.max}$, т.е. това е най-неблагоприятната скорост на полета на хеликоптера с външно пожарогасително устройство от гледна точка на осигуряване на безопасност на полета при въздействие на вертикален възходящ порив на вятъра.

От физична гледна точка това може да бъде обяснено по следния начин. При малки скорости на полета на хеликоптера и въздействие на порив на вятъра, се получава сравнително малко нарастване на аеродинамичния момент от тангажа на външното пожарогасително устройство, което извежда устройството от състояние на равновесие. Нарастването на аеродинамичния момент се увеличава с увеличаването на скоростта на хоризонтален полет на хеликоптера, което е свързано основно с изменение на началното балансировъчно положение на външното устройство преди въздействието на порива. При увеличаване на скоростта V_{hf} нараства ъгълът на тангаж ϑ_1 на устройството, увеличава се надлъжната аеродинамична сила, предизвикана от въздействието на порива на вятъра, която създава значителен момент спрямо точката на закачване към хеликоптера на централния кабел на външното пожарогасително устройство. В резултат на това обстоятелство, при увеличаване на скоростта на хоризонтален полет на хеликоптера постоянно се увеличава максималната стойност на ъгловата скорост на тангаж на пожарогасителното устройство, повлияна от въздействието на порив на вятъра. От друга страна, при увеличаване на скоростта

на хоризонтален полет на хеликоптера намалява разполагаемото време за въздействие на порива върху самото устройство, което води до намаляване на импулса, предаван на външното устройство от порив на вятъра. Противодействието на проявяващите се тенденции под въздействието на тези два фактора води до характера на полученото по-горе разпределение на ъглите на отклонение във функция от скоростта на установен хоризонтален праволинеен полет на хеликоптера.

Такъв извод може да бъде формулиран и за външни товари, при които балистичният коефициент съществено се различава от разгледания по-горе пример. При увеличаване на балистичния коефициент съществуващият максимум на отклонението $A_{th.max}$ се премества в областта на малките скорости на полета на хеликоптера, а при намаляване се премества в областта на големите скорости.

Заключение

Изследванията и анализът на получените резултати показват, че характерът на влияние на параметрите на полета на хеликоптера и на външното пожарогасително устройство за характеристиките на колебателния процес на устройството по крен при въздействие на страничен порив на вятъра е аналогичен на характера на влияние на посочените параметри на характеристиките на колебателния процес на външното устройство по тангаж при действие на вертикален възходящ порив на вятъра, който беше описан по-горе.

Съществуват някои особености на страничната динамична устойчивост на външното пожарогасително устройство в полет на хеликоптер AS532AL Cougar за гасене на пожар. Например, времето на преходния процес t_{tp} и абсолютното отклонение A_{th} по ъгъл на отклонение на централния кабел при колебания по крен в резултат на въздействие на страничен порив на вятъра са значително по-големи, отколкото при колебания по тангаж поради въздействие на вертикален възходящ порив на вятъра, при равни други условия.

Литература:

1. SEI Industries LTD. | Engineered Solutions. www.sei-ind.com /product-families
2. Козловский, В.Б., М.С. Кубланов, Математическая модель полета вертолета с грузом на внешней подвеске // Научн. Вестник МГТУ ГА № 72. Сер. „Аэромеханика и прочность“. М.: Изд. МГТУ ГА, 2004. с. 5–9
3. Stuckey, R.A., Mathematical Modelling of Helicopter Slung-Load Systems, Air Operations Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, DSTOTR1257, 2002
4. Загорски, Н. Безопасност на полета на хеликоптер с външно пожарогасително устройство и влияние на параметрите на устройството на някои от балансировъчните характеристики на хеликоптера. Годишна международна научна конференция на ВВВУ „Г. Бенковски“, Долна Митрополия, 2022, ISSN: 2738-716X, с. 26–32
5. Flight safety. State of Flight Safety in the World. ICAO. 2013 Edition. H3C5H7. 54 p. www.icao.int
6. Козловский, В.Б. и др. Вертолет с грузом на внешней подвеске / В.Б. Козловский, С.А. Паршенцев, В.В. Ефимов; под ред. В. Б. Козловского. – Москва: Машиностроение, Машиностроение-Полет, 2008. – 302, ISBN 978-5-217-03415-4
7. Cicolani, L.S. and Kanning, G., Equations of Motion of Slung-Load Systems, Including Multilift Systems, NASA, 1992, NASA-TP-3280.

ДИСТАНЦИОННИ ИЗМЕРВАНИЯ НА АТМОСФЕРНИ ЗАМЪРСИТЕЛИ С БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

Павлин Граматиков, Стефан Шопов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; stephan.shopov@gmail.com

Ключови думи: *дистанционни измервания, атмосферни замърсители, безпилотни летателни апарати, бордни системи, мониторинг на околната среда*

Резюме: *Разгледани са видовете атмосферни замърсители, сензори и методи на тяхното измерване. Дадени са резултати от измервания на атмосферни замърсители, получени от системи, работещи на борда на спътник и безпилотни летателни апарати (БЛА), самолетен и мултикоптерен тип. Разглеждат се възможностите за приложение на БЛА в райони без изградени автоматични измервателни станции, при анализ на вертикалното разпределение на замърсителите. Обсъждат се предимствата на БЛА спрямо традиционните методи, свързани с мобилност, гъвкавост и висока пространствена и времева резолюция на данните. Получените резултати подчертават потенциала на БЛА да допълват съществуващите мониторингови мрежи и да осигуряват нови възможности за научни и приложни изследвания на качеството на въздуха.*

REMOTE MEASUREMENTS OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES

Pavlin Gramatikov, Stefan Shopov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; stephan.shopov@gmail.com

Keywords: *remote sensing, atmospheric pollutants, unmanned aerial vehicles, onboard systems, environmental monitoring*

Abstract: *The types of atmospheric pollutants, sensors, and methods for their measurement are discussed. Results from measurements of atmospheric pollutants obtained from systems operating on board satellites and unmanned aerial vehicles (UAV), both aircraft and multicopter types, are presented. The possibilities for applying UAVs in areas without automatic measuring stations are examined in the analysis of the vertical distribution of pollutants. The advantages of UAV over traditional methods in terms of mobility, flexibility, and high spatial and temporal resolution of data are discussed. The results obtained highlight the potential of UAVs to complement existing monitoring networks and provide new opportunities for scientific and applied research on air quality.*

Въведение

Атмосферното замърсяване е резултат от разнообразни източници и включва широк спектър от замърсители: газове; твърди частици; биологични молекули; озон; тежки метали и радиоактивни изотопи. Тяхното въздействие варира от локални замърсявания до глобални ефекти върху климата и озоновия слой. Традиционните наземни методи за мониторинг са ограничени поради липса на мобилност и високи разходи, докато използването на безпилотни летателни апарати (БЛА) се очертава като ефективна алтернатива. В последните години БЛА се утвърждават като обещаващ инструмент за дистанционни измервания на атмосферни замърсители. БЛА могат да бъдат оборудвани с миниатюрни сензори за измерване на основни замърсители и измерват замърсявания по зададени маршрути. БЛА дават данни с висока пространствена и времева резолюция, които се анализират чрез географски информационни

системи (ГИС) и специализиран софтуер за създаване на карти на замърсяването и идентифициране на източници. Предимствата на БЛА включват мобилност, безопасност, икономическа ефективност, възможност за триизмерно картографиране и бърза реакция при аварийни ситуации. БЛА се прилагат за мониторинг на въздуха в градски и индустриални зони, откриване на течове, проследяване на пожари или вулканични изригвания, както и за научни изследвания. Съществуват предизвикателства при използване на БЛА, свързани с калибрирането на сензори, метеорологични условия, регулации и ограничения в продължителността на полета. БЛА е модерен и мощен инструмент, който усъвършенства методите за мониторинг и управление на качеството на атмосферния въздух.

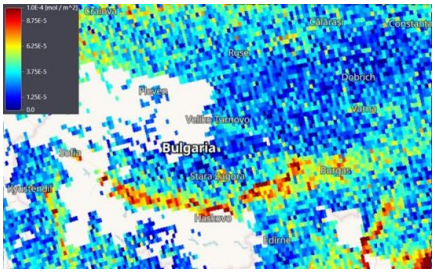
Видове атмосферни замърсители и значение

Част от атмосферните замърсители са следните видове: ***газове*** – въглероден диоксид CO_2; въглероден монооксид CO; серен диоксид SO_2; азотни оксиди N_2O, NO, NO_2 , N_2O_5 , N_2O_4; метан CH_4 и хлорфлуоровъглероди; ***частици*** – органични и неорганични; ***биологични молекули***; озон O_3 и ***олово*** Pb. При активно използване на изкопаеми енергоносители бързо се увеличава концентрацията на CO_2 в атмосферата. След водната пара и CO_2 метанът е третият по значение парников газ в атмосферата на Земята. Неговият принос към парниковия ефект е 4÷9%.

Въглеродният диоксид CO_2 има дългосрочно въздействие върху климата в продължение на хиляди години, докато CH_4 и азотният оксид N_2O имат кратък живот в свободно състояние.

Хлорфлуоровъглеродите са органични съединения, състоящи се от атоми на хлор (Cl), флуор (F) и въглерод (C). Различават се ***нисши*** хлорфлуоровъглероди (CFC) – нискокипящи органични съединения на базата на метанови, етанови и пропанови редове, както и ***висши*** хлорфлуоровъглероди, които са високомолекулни съединения. Разпространен представител е дифтордихлорметан (Фреон R12, Фреон-12, Хладон-12, CFC-12). Много хлорфлуоровъглероди се използват широко като хладилни агенти, в аерозолни системи и разтворители. Хлорфлуоровъглеродите допринасят за изчерпването на озоновия слой в горните слоеве на атмосферата и тяхното производство се преустановява.

Други видове атмосферни замърсители са: ***физически*** – механични (прах, твърди частици); ***радиоактивни*** (радиоактивно излъчване и изотопи); ***електромагнитни*** (различни видове електромагнитни вълни, включително радиовълни); ***акустични*** (различни силни звуци и нискочестотни колебания) и ***топлинни*** (изхвърляне на топъл въздух и др.); ***химически*** – газообразни вещества и аерозол; ***биологични*** – основното замърсяване е от микроби. Има замърсяване на въздуха с вегетативни форми, спори на бактерии и гъби, вируси, както и техните токсини и продукти на жизнената дейност. Основните химически замърсители на атмосферата са: CO; азотни оксиди; SO_2; въглеводороди; алдехиди; тежки метали (Pb, Cu, Zn, Cd, Cr); амоняк; прах и радиоактивни изотопи. Изгарянето на каменни въглища, производството на цимент и топенето на чугун са основни източници на прах и черен въглерод (BC) в атмосферата.



Фиг. 1. Замърсяване с NO_2 над магистралите в България [1]

Фиг. 2. Безпилотна летателна система MANTA C1 [3]

Директните измервания на атмосферните замърсители се извършват в една точка, а дистанционните методи предоставят данни за обемното съдържание на замърсители. Измерванията от спътници дават съдържанието на даден замърсител в цялата колона на атмосферата в дадена област [1]. Сателитът TROPOMI измерва в четири канала (UV, visible, NIR и SWIR) различни газови колони, както и свойства на облаци и аерозоли. Извличането на NO_2 се извършва от видимата лента (400–496 nm), която има спектрална разделителна способност и дискретизация от 0,54 nm и 0,20 nm със съотношение сигнал/шум около 1500 [1]. Отделните наземни пиксели са 7,2 km по протежение и 3,6 km в напречните посоки в средата на участъка. Пълната ширина на ивицата е около 2600 km [1]. На Фиг. 1 е дадено увеличението на NO_2 над големите райони над двете магистрали – Струма и Тракия [1].

Технологии за измерване на атмосферни замърсители

Фотойонизационният детектор (PID), недисперсионният инфрачервен газов детектор (NDIR), електрохимичният сензор (EC) и сензорите за прахови частици (PM2,5 и PM10) са част от технологии за откриване на различни газове и пари. Тези сензори се интегрират в преносими и стационарни системи за измерване на замърсители. PID сензорите се използват за откриване на летливи органични съединения (VOC) и други газове на нива от частици на милиард (ppb), с типична енергия на йонизация от 10,6 eV. За откриване на VOC се използват ултравиолетова (UV) светлина за йонизиране и газова хроматография (GC). Принцип на работа на PID:

1. Фотойонизация: Източник на UV светлина в сензора осветява анализирания газ.
2. Йонизиране на молекулите: UV светлината въздейства на молекулите на VOC, те губят електрони и се превръщат в положителни йони.
3. Откриване на йони: Генерираните положителни и отрицателни йони се събират от електроди в сензора и се измерва протичащият електрически ток.

NDIR измерва CO_2, метан (CH_4) и други газове, абсорбиращи инфрачервено лъчение и дава точни и стабилни показания във времето. Излъчва се инфрачервена светлина през проба от газ, като избраният газ абсорбира светлина на характерна дължина на вълната, което води до намаляване на преминаващата светлина. Измереното отслабване на светлината е пропорционално на концентрацията на газа в пробата. Принцип на работа на NDIR:

1. Източник на инфрачервена светлина: Широкоспектрален източник (например инфрачервена лампа или LED) излъчва светлина през газова камера.
2. Оптичен филтър: Филтърът пропуска само тази дължина на вълната, която е специфична за абсорбцията на газа, който трябва да бъде детектиран.
3. Газова камера: Газът преминава през камера, облъчен от инфрачервените вълни.
4. Детектор: Измерва количеството инфрачервена светлина, преминала през камерата.
5. Обработка на сигнала: Отслабването на преминаващата светлина е право пропорционално на концентрацията на газа и този сигнал определя количеството газ.

Терминът "недисперсионен" означава, че сензорът не използва дисперсионни елементи като призми или дифракционни решетки за разделяне на светлината на отделни спектрални компоненти, както правят други спектрометри. NDIR използва оптичен филтър за избиране само на необходимата дължина на вълната за измерване. NDIR сензорите са широко използвани за:

- Измерване на нивата на CO_2 във въздуха;
- Детекция на други газове като CH_4, CO, хладилни агенти и други въглеводороди;
- Индустриална безопасност и околна среда.

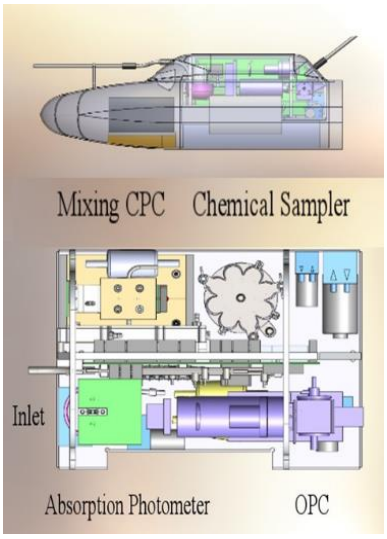
EC сензорите откриват специфични токсични газове като CO, сероводород (H_2S), амоняк (NH_3), NO_2 и SO_2 с висока чувствителност и селективност. EC откриват химични вещества чрез електрохимична реакция и измерват електрическия сигнал, получен от работен електрод, контраелектрод и електролит. Принцип на работа на EC:

- Дифузия: Веществото преминава през пореста мембрана към електрода на сензора.
- Електрохимична реакция: На работния електрод се получава каталитична реакция, при която измереното вещество се окислява или редуцира.
- Генериране на ток: Тази окислително-редукционна реакция генерира електрически ток.
- Предаване на сигнал: Външна верига преобразува този ток в аналогов сигнал, като ток (амперометричен), напрежение (потенциометричен) или импеданс (импедиметричен).
- Противоелектрод: На противоелектрода се получава равна и противоположна реакция, за да се поддържа баланс на заряда, като кислородният сензор често се нуждае от кислород.

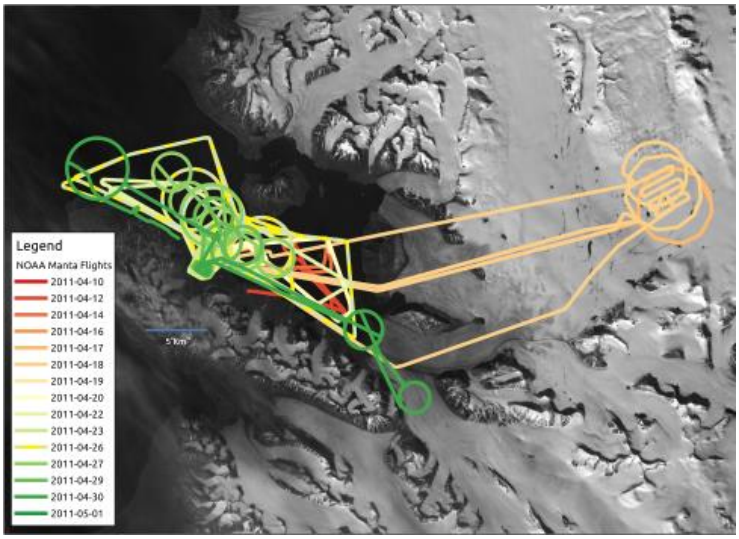
Сензорите PM използват лазерна технология за измерване, като се насочва лазерен лъч в камера за откриване, където въздухът се всмуква, обикновено чрез вентилатор. Когато въздушните частици преминават през лазерния лъч, те разсейват светлината му. Интензитетът на разсеяната светлина се преобразува в електрически сигнал от фотоелектричен сензор, който след това се усилва и после се обработва от микропроцесор. PM се ползват в преносими детектори за газ и стационарни системи за мониторинг и спазване на екологичните норми. PM се комбинират в мултисензорни инструменти за цялостен анализ на качеството на въздуха [6, 7].

Изследвания на атмосферни замърсители с БЛА тип самолетен

MANTA C1 [3] е безпилотна летателна система (UAS) с фиксирано крило, проектирана и построена от Advanced Ceramics Research (Фиг. 2). Самолетът тежи 16,3 kg без полезен товар и гориво (27,7 kg максимално тегло). Размахът на крилата е 2,7 m, височината е 0,62 m и дължината е 1,92 m. Самолетът се задвижва от 3.8 kW бензинов двигател. Каца автоматично с помощта на DGPS и изисква < 300 m писта. Самолетът лети до 4,5 h максимално на 3660 m с резервоар за 8,1 литра гориво. Събирането на данни се извършва над 60 s, вертикалната разделителна способност е 75 m, а хоризонталната разделителна способност е 1560 m. Самолетът се управлява с автопилот, който навигира до 99 географски точки. Комуникацията с MANTA C1 е чрез ненасочена антена на 900 MHz. За далечна връзка се използва Iridium SatCom.



Фиг. 3. Модул за измерване на аерозоли в MANTA C1 [3]



Фиг. 4. Полетни траектории на MANTA през 2011 г. [3]

MANTA C1 е оборудван със сонда за температура и относителна влажност (RH), проектирана от Rotronic Instrument Corporation (модел HC2). Температурите се измерват между −40 и 60 °C с точност до ±0.1 °C. RH се измерва между 0÷100 % с точност от ±0,8 %. Данните от сензорите за температура и RH се предават в реално време към наземния пункт.

Пакетът за измерване на аерозоли е проектиран и произведен от Brechtel Manufacturing Inc. (BMI, Хейуърд, Калифорния; ACCESS Модел 9400 http://www.brechtel.com/ACCESS) има модулен дизайн и може бързо да се монтира и демонтира от отделението за полезен товар на MANTA C1 (Фиг. 3), където има: смесител за вземане на проби от кондензирани частици (MCPC); 8-филтърна система за вземане на проби от химикали и абсорбционен фотометър (ABS). Модулът се захранва от една от двете батерии на самолета (15 Ah, 12 V всяка) по време на полета (до 4,5 h). Многоканалният пробоотборник има химически филтър. Аерозолният пакет включва пасивно изокинетичен вход за вкарване на въздух и частици в модула. Инструментите в модула включват MCPC (модифициран BMI, модел 1710 с обем 12,7 cm^3) и абсорбционен фотометър с три дължини на вълната (BMI ABS, 12,7×7,6×7,6 cm).

MCPC има време за реакция 180 ms и брои частици с размер 5–3000 nm. Модификацинирани са компонентите на модела 1710 за работа с бутанол поради високовибрационната среда на UAS. Концентрацията на MCPC се характеризира с вземане на проби от 60 nm частици. Електрометърът (Ioner Model 5030) взема проби паралелно с MCPC и осигурява референтно измерване на концентрацията в диапазона 100÷100000 частици cm^{-3}.

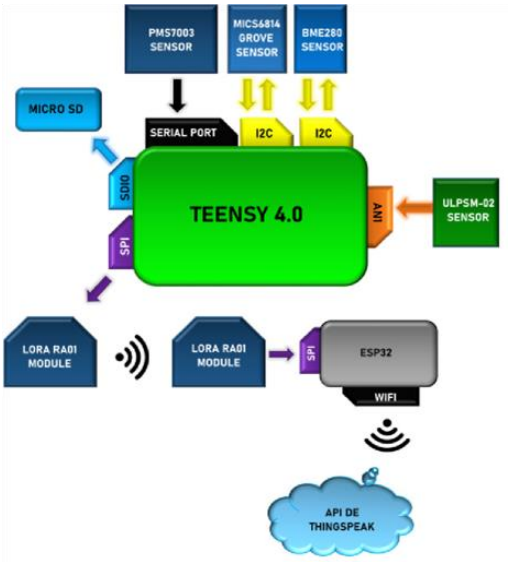
ABS осигурява измервания в реално време на коефициента на поглъщане на аерозолна светлина при 450 nm, 525 nm и 624 nm. ABS пропуска светлина от LED източник през проба. Пробоотборникът се побира в цилиндричен обем с диаметър 7,6 cm и 5,1 cm дължина. Дебитът на пробата от 2,5 L/min^{-1} се измерва чрез спад на налягането през ламинарен проточен елемент (LFE) и потокът се контролира активно с интегрирана помпа. Филтрите могат да бъдат извлечени с вода или други разтворители за наземен химичен анализ чрез йонна хроматография или други техники. Типичният план на полета е изкачване до 2700 m, спускане до височината с максимална концентрация на аерозол и след това вземане на проби на тази височина за останалата част от полета (обикновено 1–2 h). Полет номер 15 над Kongsfjorden на

26 април дава граничен слой ≈ 1000 m, ограничен от малка температурна инверсия. Долният слой има относителна влажност между 70% и 80%. Относителната влажност спада над граничния слой до 15% на 1500 m и след това се увеличава до 40% на 2200 m. Има малко увеличаване на общия брой частици точно под горната част на граничния слой, но не и увеличаване на коефициента на поглъщане на аерозолна светлина от тези частици. Горният слой (> 1700 m) има най-високи концентрации на брой частици и най-високи коефициенти на поглъщане на аерозолна светлина [3].

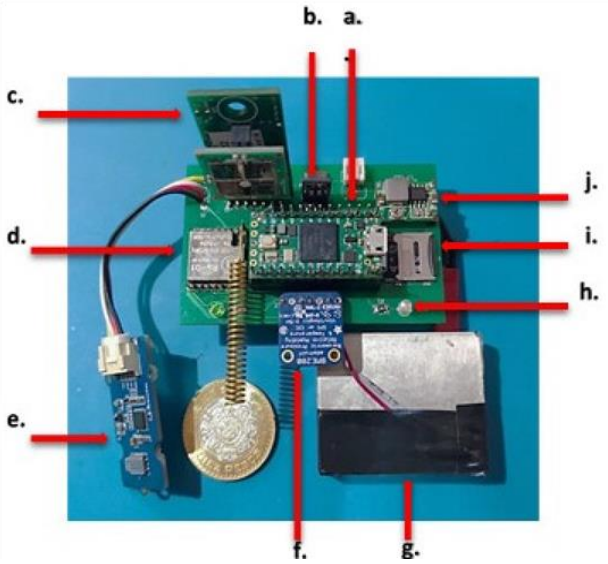
БЛА оперативно са по-гъвкави в сравнение с наземните подходи на измерване или други въздушни методи, като пилотирани самолети и сателити. БЛА "M2AV" осигурява 10 cm вертикална разделителна способност за температура, влажност, посока и скорост на вятъра [2]. БЛА ALADINA изследва 3D разпределението на ултрафините частици (UFP) в ABL и има два брояча на кондензационни частици (CPC) и оптичен брояч на частици (OPC) [2].

Изследвания на атмосферни замърсители с БЛА тип мултикоптер

В атмосферата преобладава замърсител, наричан прахови частици (PM). PM се състои от малки частици и миниатюрни течни капчици [4]. PM имат две основни групи: груби с аеродинамичен еквивалентен диаметър (AED) 2,5–10 μm и фини с AED < 2,5 μm.



Фиг. 5. Архитектура на интелигентен мултисензорен възел BME280 MICS-6814 [5]



Фиг. 6. Платки и устройства за интелигентния мултисензорен възел BME280 MICS-6814 [5]

UFP имат диаметър < 0,1 μm и са заплаха за човешкото здраве. UFP навлизат дълбоко в дихателната система и причиняват здравословни проблеми. Частиците BC се получат при непълно изгаряне на богати на въглерод горива, като дизел и биомаса.

На Фиг. 5 е дадена архитектура на интелигентен мултисенсорен възел, използван при измервани с мултикоптер Mavic 3 [5]. Системата се състои от 4 елемента: интелигентен мултисензор (сензорен възел); мобилна батерия; безжичен комуникационен модул LoRa (шлюз) и данни за визуализация и обработка (базова станция). Управлението е базирано на платката Beagle Bone Blac (BBB) AM335x, а WSN е имплементиран с LoRa NET. LoRaWAN е използван за безжични комуникации. За управление е използван едноплатков компютър SBC Raspberry. Платформите за управление, мобилната батерия и сензорите увеличават теглото до 1 kg. Измерват се концентрациите CO, NO_2, SO_2, NH_3 и суспендирани частици PM10 и PM2,5, както и температура, влажност и налягане. Сензор BME280 (Bosh Sensortec GmbH) е интегриран за измерване на температура, относителна влажност, надморска височина и атмосферно налягане с разделителна способност 0,01. Сензор MEMS Grove-Multichannel Gas Sensor MICS-6814 (SGX Sensortech) измерва: CO 1–1000 ppm; NO_2 0,05–10 ppm; $NH_3$1–500 ppm.

MICS-6814 може да измерва H_2, CH_4, пропан, етанол и изо-бутан. Сензорът ULPSM-SO2 (SPEC Sensors) измерва SO_2 в диапазон 0–20 ppm с разделителна способност 1,5 μm и точност ± 2%. На Фиг. 6 са представени печатни платки и устройствата на интелигентен мултисензорен възел: a) микроконтролер; b) регулатор 3.3 V; c) SO_2 газов сензор; d) LoRa WAN; e) сензор за множество газове; f) метеорологичен сензор; g) сензор за прахови частици; i) светодиодни индикатори; i) MicroSD; h) регулатор на напрежението.

За откриване на частици във въздуха в сензора се използва лазер, а фотодиод измерва количеството разсеяна светлина. Сензорът *Nova SDS011* има вграден вентилатор, позволяващ вземане на проби от въздуха в реално време. Освен това сензорите *Nova SDS012* и Plantower *PMS5003* са ценни алтернативи за измерване на атмосферния прах, въпреки недостатъците си от трудно калибриране [4]. За осигуряване на точни данни за позициониране БЛА има GPS модул с висока честота на актуализиране и вграден компас. Модулите Holybro Ublox M8N-GPS имат съвместимост с автопилота и дават надеждни и точни данни за позициониране. Тези модули поддържат проследяване на GPS и ГЛОНАСС сателити. Избира се компактен лек телеметричен радиокомплект, проектиран за използване с автопилотни полетни контролери [4].

Измерването на атмосферни замърсители с БЛА включва [5]:

1. Сензори: БЛА се оборудват с миниатюрни сензори за фини прахови частици (PM2,5 и PM10); азотни оксиди NO_x; SO_2; O_3; CO; VOC и CH_4.
2. Полетни планове: Задава се маршрут на БЛА, който обхваща зони с източници на замърсяване, градски райони, индустриални зони или земеделски площи. Налични са няколко инструмента за планиране на полета като DroneDeploy, Pix4D или DJI Ground Station Pro.
3. Събиране на данни: По зададения маршрут сензорите непрекъснато измерват замърсителите във въздуха. Данните се записват с информация за GPS координати, надморска височина, температура и влажност.
4. Предаване и анализ: Данните се предават в реално време към наземна станция или се записват на борда за последващ анализ. Софтуер за ГИС и специализирани програми визуализират данните, създават карти на замърсяването и идентифицират горещи точки.

Предимства на измерването на атмосферни замърсители с БЛА:

* Гъвкавост и мобилност: БЛА достигнат труднодостъпни райони, индустриални инсталации, високи комини, големи градски площи, а наземните станции измерват локално само.
* Висока пространствена и времева резолюция: БЛА събират данни на много места за кратко време, осигурявайки детайлна картина на разпространението на замърсяването.
* Икономична ефективност: В дългосрочен план измерванията с БЛА са по-евтино решение от разполагането и поддръжката на голям брой стационарни наземни станции.
* Безопасност: Не са застрашени хора при измервания в рискови зони, а БЛА.
* 3D картографиране: Позволява измервания на различни височини, което дава представа за вертикалното разпределение на замърсителите.
* Идентифициране на източници: Помага за по-точното локализиране на източниците на замърсяване, което е ключово при ефективни мерки за контрол.
* Бърза реакция: БЛА могат да бъдат бързо разгърнати при инциденти, като промишлени аварии или разливи на опасни вещества.

Приложения на измерването на атмосферни замърсители с БЛА:

* Мониторинг на качеството на въздуха в градски и индустриални зони.
* Откриване на течове на газ от газопроводи и промишлени съоръжения.
* Оценка на разпространението на замърсители от горски пожари или вулканични изригвания.
* Научни изследвания на атмосферни процеси и климатични промени.
* Контрол на емисиите от селскостопански дейности.

Предизвикателства при измерването на атмосферни замърсители с БЛА:

* Калибриране на сензорите: Миниатюрните сензори могат да изискват по-често калибриране и да имат по-ниска прецизност от наземните лабораторните уреди.
* Метеорологични условия: Вятър, дъжд и екстремни температури спират полетите на БЛА.
* Регулации: Нужни са разрешения за полети в определени зони.
* Автономност на батерията: Времето за полет е ограничено от заряда на батерията.

Въпреки предизвикателствата, дистанционните измервания на атмосферни замърсители с БЛА представляват перспективна и развиваща се технология, която значително подобрява възможностите за мониторинг и управление на качеството на въздуха.

Литература:

1. Dimitrova, Maria, and Plamen Trenchev. "Space distribution of NO_2 pollution over Bulgaria." Aerospace Research in Bulgaria 35 (2023): ISSN:1313-0927, pp. 28–33
   https://doi.org/10.3897/arb.v35.e03
   http://journal.space.bas.bg/arhiv/n%2035/Articles/3_Dimitrova.pdf
2. Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljievic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives. *Sensors*, *16*(7), 1072, (2016). ISSN:1424-8220, pp. 1–19
   https://doi.org/10.3390/s16071072
   https://www.mdpi.com/1424-8220/16/7/1072/pdf?version=1468322670
3. Bates, T. S., Quinn, P. K., Johnson, J. E., Corless, A., Brechtel, F. J., Stalin, S. E., & Burkhart, J. F. (2013). Measurements of atmospheric aerosol vertical distributions above Svalbard, Norway, using unmanned aerial systems (UAS). *Atmospheric Measurement Techniques*, *6*(8), ISSN:1867-8548, 2115-2120, pp. 1–29
   https://doi.org/10.5194/amt-6-2115-2013
   https://amt.copernicus.org/articles/6/2115/2013/amt-6-2115-2013.pdf
4. Bakirci, Murat. "Efficient air pollution mapping in extensive regions with fully autonomous unmanned aerial vehicles: A numerical perspective." *Science of the Total Environment* 909 (2024): 168606, ISSN: 1879-1026, pp. 1–16
   https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168606
   https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072340/pdfft?casa_token=W_LDUi_il1sAAAAA:s49dHvw49LNQIo9n37vMa1rVgqwmAhMePTTskUysiVtDu1nZEXdnkd8lJLSAKo36fiSRPBXQgs&md5=c5dae8aad45a50078090a3b88773f992&pid=1-s2.0-S0048969723072340-main.pdf
5. Camarillo-Escobedo, R., Flores, J. L., Marin-Montoya, P., García-Torales, G., & Camarillo-Escobedo, J. M. (2022). Smart multi-sensor system for remote air quality monitoring using unmanned aerial vehicle and LoRaWAN. *Sensors*, *22*(5), 1706., ISSN: 1879-1026, pp. 1–29
   https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168606
   https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072340/pdfft?casa-main.pdf
6. Наредба №1, 27 юни 2005 г., Норми за допустими емисии на вредни вещества (замърсители), изпускани в атмосферата от обекти и дейности с неподвижни източници на емисии - в сила от 06.08.2006 г.
7. Закон за чистотата на атмосферния въздух – посл. изм. ДВ. бр. 41 от 10 Май 2024 г.

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

ПОЗИЦИОНИРАНЕ В РЕАЛНО ВРЕМЕ (RTK) ЗА БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

Павлин Граматиков[1], Джулиан Тахов[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Д АЕРОСПЕЙС ООД
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com

***Ключови думи:**, безпилотни летателни апарати, бордни системи, дрон за геодезия, дрон за картографиране, дрон с RTK, индустриален дрон, професионален дрон*

***Резюме:** Изложени са резултати* от полети на *безпилотни летателни апарати, оборудвани с устройства за кинематика в реално време. Изчисленията са извършени с различни професионални платформи за обработка на изображения.*

REAL-TIME KINEMATIC (RTK) POSITIONING FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Pavlin Gramatikov[1], Dzhulian Tahov[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]D AEROSPACE Ltd.
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com

***Keywords:** unmanned aerial vehicles, onboard systems, surveying drone, mapping drone, RTK drone, industrial drone, professional drone*

***Abstract:** The results of flights of unmanned aerial vehicles equipped with real-time kinematics devices are presented. The calculations were performed using various professional image processing platforms.*

Въведение

Кинематиката в реално време RTK (Real Time Kinematic), е усъвършенствана форма на позициониране с помощта на глобална навигационна спътникова система (GNSS), която осигурява точност 1–2 cm, което значително надвишава точността от 2–5 m, типична за стандартния GPS/GNSS метод. RTK системата е съвкупност от методи и техники за получаване на координати и височини на точките на местността и полета на безпилотния летателен апарат (БЛА), с точност до cm чрез получаване на корекции от базова станция, приемани от бордната апаратура на БЛА. За тази цел се измерват фазите на носещия GPS сигнал L1 едновременно на два GPS радиоприемника. Координатите на базовия (референтен) радиоприемник трябва да бъдат точно определени (той може да бъде инсталиран в точка от държавната геодезична мрежа). Той предава набор от корекции по радиомодем до БЛА. Вторият радиоприемник използва данните за корекциите, за да определи точно местоположението си на разстояния от порядъка на 10–30 km от първия приемник. Поправките могат да се предават във формат RTCM SC-104. Скоростта на предаване е 2400 bit/s, а закъснението на предаването е 0,5–2 s.

RTK измерването е геодезичен метод за измерване или маркиране на точки с помощта на GNSS, като GPS, GLONASS, GALILEO и др. Използват се сигнали от най-малко пет GPS-сателита (препоръчителни са най-малко шест сателита). Необходими са най-малко две GPS-антени. Първата се намира на референтната станция, а втората се монтира на БЛА. Позицията на БЛА се определя чрез триизмерно полюсно прикачване към референтната станция. Вместо временни референтни станции може да се ползват и постоянни референтни

станции, които се предоставят от частен оператор или от геодезични служби (SAPOS, ASCOS). За да не се създават прекалено много референтни станции, се използва мрежова RTK. Тук няколко референтни станции се свързват в мрежа и корекционните данни се предават на ровъра чрез мобилен телефон (SAPOS мрежа). Максималното разстояние на ровъра от референтната станция при временни референтни станции при благоприятни условия е до 10 km. При постоянни референтни станции RTK е възможно над 20 km. При мрежови RTK референтните станции са на разстояние 50–100 km една от друга. За мрежовия RTK теоретично могат да се приложат два метода. При първия метод на потребителя се предават само параметри за корекция на площта, а при втория метод БЛА изпраща приблизителните си координати чрез мобилен телефон в мрежовия център, където се изчислява оптимална триъгълна мрежа и след това се предават корекционни данни за тази приблизителна позиция обратно на ровъра (принцип на виртуалната референтна станция). На практика се използва само вторият метод. С развитието на технологията на RTK и прецизните инерционни измервателни устройства (IMU), БЛА оборудвани с RTK могат да постигнат висока точност на фотографиране, без да са необходими наземни контролни точки (GCP), което може значително да намали времето и разходите за работа на терен и подобрява ефективността и качеството на геодезията и картографирането.

По-голямата част от търговските и поръчкови БЛА имат един или два GNSS приемници на борда за определяне на позицията и безопасно навигиране на БЛА. За малките БЛА се използват компактни и леки бордни GNSS модули. Приемниците от геодезически клас не са подходящи за БЛА поради теглото и размерите на антената. БЛА трябва да получава в реално време както сателитни сигнали, така и RTK корекции от станцията. Тези корекции позволяват разграничаване на наблюдаемата фаза в реално време, като по този начин се оценяват базовите линии (3D вектори), свързващи двата приемника и се избягва по-голяма част от източници на грешки, които обикновено влияят на GNSS сигналите. През последното десетилетие се предлагат евтини GNSS модули, главно базирани на платки Ublox. Евтините GNSS модули получават само носещия сигнал L1.

Разликата между сигналите L1 и L2 в GPS се състои в тяхното предназначение и характеристики. Основен диапазон е L1 1575,42 MHz и се използва за граждански, военни, авиационни и космически нужди. Честотата на L2 е 1227,60 MHz и е допълнителен диапазон, използван за по-точно определяне на координатите. Благодарение на по-ниската честота, сигналът L2 по-добре заобикаля препятствия и е по-малко зависим от метеорологичните условия. За общо позициониране се използва L1, а L2 за по-точно определяне на координатите в сложни условия, когато сигналите срещат препятствия като облаци, дървета и сгради.

Към 18 септември 2012 г. грешките в навигационните определения на ГЛОНАСС по дължина и ширина са 3–6 m. В същото време грешките на GPS са 2–4 m. При едновременно използване на двете навигационни системи се получава значително повишаване на точността. Европейският проект EGNOS, [8] който използва сигналите и на двете системи, дава точност на определяне на координатите на територията на Европа на ниво 1,5–3 m.

В [6] са сравнени три фотограметрични софтуера на БЛА за 3D моделиране на гори: AgiSoft Photoscan; PIX4DMapper и DJI Terra. Резултатите показват, че Pix4D и AgiSoft генерират по-плътни облаци от точки от DJI Terra. Въпреки това, DJI Terra предоставя по-добър облак от дървета от другите два софтуера, поради използването на подобрен алгоритъм за съвпадение.

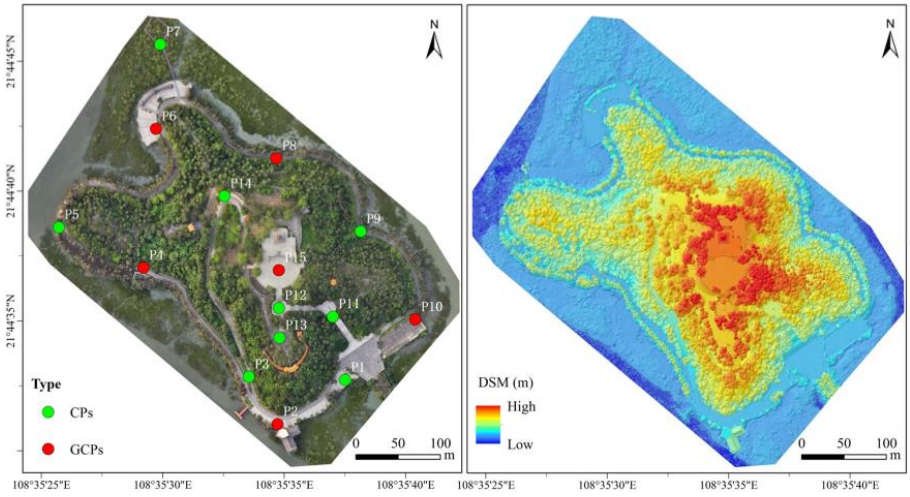
Използване на мултикоптери за картографиране

За синтетичен анализ на абсолютната и относителната точност на позициониране с RTK са избрани: квадрокоптер Mavic 3 (Фиг. 2); борден DJI Mavic 3 Enterprise RTK-Modul (Фиг. 3) и разновидност на оборудването M3M. Използват се две професионални платформи DJI Terra и Pix4Dmapper за обработка на изображения на БЛА [4].

На Фиг. 1 са дадени: местоположенията на 15-те точки на измерване от които 6 са тип GCP, а 9 са от вид CP; цифровата ортофото карта (DOM) и цифровият модел на повърхността (DSM). В Таблица 2 са дадени стойностите на средноквадратичната грешка (RMSE), [4]. При условие на използване на GCP, резултатите от обработката, базирани на Pix4Dmapper отговорят на изискванията за точност на картографиране при въздушни карти с мащаб 1:500. За разлика от тях, резултатите, базирани на DJI Terra, отговарят на изискванията в хоризонтална посока и леко надвишават изискването за точност на картографиране от 0,15 m във вертикална посока.

При сравняване на Таблица 1 с Таблица 2, стойностите на RMSE в хоризонталната (XY) и вертикалната (Z) посока на изображенията, получени от двете платформи с GCP, са малко по-високи от тези без GCP. В резултат на това не се повишава значително абсолютната точност на позициониране на БЛА Mavic 3 в режим RTK с GCP [4].

Проверени са абсолютната и относителната точност на позициониране на оборудвани с RTK индустриален БЛА Mavic 3 при условия със и без GCP. Основните изводи са следните [4]:



Фиг. 1. DOM (a) и DSM (b) от DJI Terra без GCP [4]

(А) При подходящи условия оборудваните с RTK БЛА Mavic 3 Enterprise Series не изискват GCP, за да отговарят на изискванията за хоризонтална и вертикална точност в мащабна карта 1:500. В това проучване RMSE в хоризонтална посока не надвишава 0,05 m, а RMSE във вертикална посока не надвишава 0,15 m. Този модел може да се използва директно за проучване и картографиране на райони, където е трудно да се създадат GCP, като морски острови, ледникови форми на релефа и опасни региони. По време на фотограметрията се отчитат влиянието на височината на полета, състоянието на сигнала, периода на снимане, припокриването на изображението, характеристиката на терена, скоростта на вятъра.

(Б) Добавянето на GCP в RTK режим не може значително да подобри точността на картографиране на Mavic 3 EnterpriseSeries. Този експеримент установява, че стойностите на RMSE на изображенията в хоризонтална и вертикална посока с GCP са малко по-големи от резултатите без GCP. При проучвания, базирани на БЛА DJI Phantom 4 RTK е установено, че добавянето на GCP може да подобри точността на фотограметрията. Разликите в заключенията се обясняват с различните характеристики на БЛА, условията на полет при фотографирането, характеристиките на терена на изследваната зона и грешките при обработката на закрито.

(В) При условие, че няма GCP, относителната точност на позициониране на индустриалния БЛА Mavic 3 е много висока, с малки грешки в хоризонталните и вертикалните разстояния. Стойностите на RMSE на хоризонталното и вертикалното разстояние на изображенията без GCP са съответно 0,042 m и 0,109 m (DJI Terra) и 0,032 m и 0,068 m (Pix4Dmapper). Серията Mavic 3 Enterprise може да се използва при: измерване на разстояние и промяна на надморската височина; безопасност на мините; мониторинг на деформация на язовири; потвърждаване на правата на селски имоти; строителство на пътни платна; промени в бреговата линия; мониторинг на растежа на културите; измерване на земетресения; измерване на височината на горите и т.н. Резултатите са получени при височина на полета 100 m, но при намаляването на височината ще има по-добро наблюдение на по-малки детайли.

(Г) Изображенията от DJI Terra и Pix4Dmapper отговарят на изискването за точност на картографиране 1:500. Pix4Dmapper е по-добър по точност в сравнение с DJI Terra [4].

Модулът DJI Mavic 3 Enterprise RTK (Фиг. 3) дава позициониране с точност до сантиметър при използване на службите Network RTK, Custom Network RTK или мобилната станция D-RTK 2. В комплекта на DJI Mavic 3 се предлагат: RGK SC100 полеви контролер; RGK SR1 - GNSS/GPS приемник и SingularPad - програмно обезпечение.

Техническите характеристики на бордния DJI Mavic 3 Enterprise RTK-Module са:

- Тип на съединение: USB-C;
- Номинална мощност: около 1,2 W;
- Точност на позициониране с RTK: RTK Fix: 1 cm + 1 ppm (по хоризонтала) и 1,5 cm + 1 ppm (по вертикала).

Системи и честоти:

- GPS: L1C/A L2C/L2P; GPS е контролирана от Министерството на отбраната на САЩ;
- BDS: B1I B2I; Китайска система за сателитна навигация „Бейдоу“ (BDS);
- GLO: G1 G2; GLONASS е притежаван и управляван от Русия;
- GAL: E1 E5b; Galileo е притежаван и управляван от Европейския съюз;
- QZSS: L1 L2; QZSS е притежаван от Япония и управляван от QZS System Service Inc.
  Размери: 50,2 x 40,2 x 66,2 mm и тегло: 24 ± 2 g
  Скорости 16 KB/s / 32 KB/s

Техническите характеристики GNSS базов приемник RGK SR1 за DJI Mavic 3 са:

- Брой канали 1198
- NAVSTAR GPS L1 C/A, L1C, L1P, L2P, L2C, L5
- GLONASS L1OF, L2OF, L1OC, L2OC, L3OC
- BeiDou B1I, B2I, B3I, B1C, B2a, B2b
- Galileo E1, E5a, E5b, E6, E5 AltBoc, E6c
- QZSS L1 C/A, L2C, L5, L1C, L1S, L5S, L6
- NavIC L5
- SBAS WAAS, EGNOS, SDCM, BDSBAS, GAGAN

Фиг. 2. DJI Mavic 3 Enterprise

Фиг. 3. DJI Mavic 3 Enterprise RTK-Modul

Таблица 1. Статистика за грешките при картографиране с БЛА без GCP [m] [4]

Платформа	Статистика	$\lvert\Delta X\rvert$	$\lvert\Delta Y\rvert$	ΔXY	$\lvert\Delta Z\rvert$
DJI Terra	Максимален Нисък Стандартно отклонение RMSE	0.047 0.017 0.013 0.021	0.058 0.030 0.016 0.035	0.065 0.039 0.017 0.041	0.281 0.122 0.075 0.143
Pix4Dmapper	Максимален Нисък Стандартно отклонение RMSE	0.045 0.009 0.012 0.017	0.046 0.018 0.013 0.025	0.049 0.027 0.014 0.030	0.119 0.027 0.032 0.048

Таблица 2. Статистика на стойностите на RMSE в въздушни изображения на БЛА с GCP [m] [4]

Платформа	Вид	X	Y	Хоризонтален (XY)	Вертикален (Z)
DJI Terra	GCPs CPs	0.024 0.035	0.034 0.034	0.042 0.049	0.132 0.158
Pix4Dmapper	GCPs CPs	0.020 0.025	0.021 0.025	0.029 0.035	0.082 0.074

Приложението на DJI Mavic 3 Enterprise (виж Фиг. 2) за комбиниране на данни от бордна камера и смартфон iPhone 15 Pro (който съдържа LiDAR и поддържа RTK) са описани в [5]. Позициите, получени от интегрираните данни на БЛА и iPhone 15 Pro, се сравняват с контролни точки, за да се определи количествено точността и надеждността на данните. Използват се техники за последваща обработка на кинематични данни (PPK) за валидиране на траекториите

на всички системи за събиране на данни, като се гарантира надеждността на получените данни, особено в случаите, когато може да липсват RTK корекции.

На Фиг. 4 е даден по-новият модел на DJI Matrice 300 RTK Combo [2, 3] използващ: мобилна станция D-RTK 2; акумулатори 2xTB60; зарядная станция BS60; D-RTK 2 и статив за D-RTK 2. Мобилната станция D-RTK 2 използва: NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol); 4G модем или WiFi; бордно съхраняване на данните за Post Processed Kinematics (PPK). Камерата на DJI Matrice 300 има 1-инчов, 20 мегапикселов CMOS сензор и механичен затвор за избягване на размазване на изображението.

Фиг. 4. DJI Matrice 300 RTK, зарядна станция BS60, D-RTK 2 и статив за D-RTK 2

Фиг. 5. БЛА DJI Phantom 4 RTK SE и мобилна станция D-RTK 2

Остарелият БЛА модел Phantom 4 RTK (Фиг. 5) постига разделителна способност 2,74 cm при височина на полета от 100 m. Има две режима – Фотограметрия и Маршрутен полет. Приложението може да зарежда KML Area файлове директно за предварително планиране на полет. С вграденото приложение за планиране на полета (GS RTK) и лесния метод за събиране на RTK данни (RTK Network или D-RTK 2 мобилна станция) се правят проучвания, картографиране или инспектиране. РТК позициониране достига точност до cm. Мобилната станция поддържа комуникация чрез 4G, OcuSync, WiFi и LAN. До 5 дистанционни управления могат да бъдат едновременно свързани към D-RTK 2.

Фиг. 6. Модул H-RTK F9P и бордна апаратура [1]

Фиг. 7. Мобилна станция DJI D-RTK 3

Мобилната станция DJI D-RTK 3 (Фиг. 7) служи като базова станция за едновременно определяне на местоположението на няколко дрона с точност до cm или като ретранслационна станция за увеличаване на обхвата на полета на БЛА.

Компанията Ublox (Швейцария) произвежда и продава новите приемници от клас F9P. Те са двучестотни и многосъзвездни GNSS приемници, които подобряват RTK производителността. Holybro (Хонконг) вгражда F9P в продукта си "H-RTK F9P" (https://holybro.com/products/h-rtk-f9p-gnss-series посетен на 11 септември 2024 г.). Тест-1 и Тест-2, [1] симулират условията на кръжане на БЛА, който влиза и излиза от тунел и работи близо до висока стена на сградата. Изследват се възможностите на RTK модули при полет на БЛА в критична среда (инспекция на инфраструктура и мостове, строителство и др.). Тест-3 [1] има за цел да провери позиционирането на БЛА, летящ в тунела и излизащ от него.

БЛА Azriel, описан в [7] извърши полети с полезен товар 5 kg на разстояние 10 km. На борда на Azriel е монтиран RTK модул **H-RTK mosaic-H (Dual Antenna Heading),** Holybro SKU: 12051. Параметрите му са: GPS L1, L2; Galileo E1, E5b; GLONASS L1, L2; Beidou B1, B2, B3; QZSS L1C/A, L1C/B, L2; SBAS Egnos, WAAS, GAGAN, MSAS, SDCM (L1); RTK хоризонтална точност 0.6 cm + 0.5 ppm; RTK вертикална точност 1 cm + 1 ppm. За базова станция Azriel използва **H-RTK NEO-F9P w/ Base Station Antenna**, Holybro SKU:12065. В модула е интегриран GNSS приемник u-blox NEO-F9P, компас RM3100 и трицветен LED индикатор. GNSS лентите му са: GPS: L1C/A и L5; GLONASS: L1OF; Galileo: E1-B/C и E5a; BeiDou: B1I и B2a; QZSS: L1C/A, L1S и L5; SBAS: L1C/A; RTK хоризонтална точност 0.01 m +1 ppm; RTK вертикална точност 0.01 m +1 ppm.

Заключение

RTK е мощен инструмент за повишаване на точността и ефективността на работата на БЛА. С негова помощ може значително да се подобри качеството на данните, получавани в различни области и да се оптимизират процесите, изискващи висока точност на позициониране.

Все повече индустриални потребители използват БЛА оборудвани с RTK с директна географска връзка при мисии за въздушно фотографиране.

Литература:

1. Tavasci, Luca, Francesco Nex, and Stefano Gandolfi. Reliability of real-time kinematic (RTK) positioning for low-cost drones' navigation across global navigation satellite System (GNSS) critical environments. *Sensors* (Basel, Switzerland) 24.18 (2024): 6096.ISSN: 1424-8220, pp. 1–16 https://doi.org/10.3390/s24186096 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11435761/pdf/sensors-24-06096.pdf
2. Czyża, S., Szuniewicz, K., Kowalczyk, K., Dumalski, A., Ogrodniczak, M., & Zieleniewicz, Ł. (2023). Assessment of accuracy in unmanned aerial vehicle (uav) pose estimation with the real-time kinematic (rtk) method on the example of dji matrice 300 rtk. *Sensors,* 23(4), 2092. ISSN: 1424-8220, pp. 1–29 https://doi.org/10.3390/s23042092 https://pdf.sciencedirectassets.com/270704/1-s2.0-S1110016821X00051
3. Yildiz, Veysel, and Aydan Yaman. Comparison and accuracy assessment of unmanned aerial vehicle and terrestrial measurement in base map production. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 28.1 (2025): ISSN: 2090-2476, pp. 53–62 https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.12.003 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982324000875/pdfft?md5=28efa9a157fdd7493c183f66a71aec67&pid=1-s2.0-S1110982324000875-main.pdf
4. Tan, C., Chen, Z., Liao, A., & Zeng, X. (2024, July). Accuracy assessment of Mavic 3 industrial UAV based on DJI Terra and Pix4Dmapper. *In Fifth International Conference on Geology, Mapping, and Remote Sensing (ICGMRS 2024)* (Vol. 13223, pp. 498-504). SPIE https://doi.org/10.1117/12.3035344 https://www.researchgate.net/profile/Chenyan-Tan/publication/382157170_Accuracy_assessment_of_Mavic_3_industrial_UAV_based_on_DJI_Terra_and_Pix4Dmapper/links/674bde11359dcb4d9d47192a/Accuracy-assessment-of-Mavic-3-industrial-UAV-based-on-DJI-Terra-and-Pix4Dmapper.pdf
5. Tamimi, Rami, and Charles Toth. Experiments with combining LiDAR and camera data acquired by UAS and smartphone to support mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 48 (2024):* ISSN: 2194-9050, pp. 619–627 https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-619-2024 https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-2024/619/2024/isprs-archives-XLVIII-1-2024-619-2024.pdf
6. Jarahizadeh, Sina, and Bahram Salehi. A comparative analysis of UAV photogrammetric software performance for forest 3D modeling: A case study using AgiSoft photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra. *Sensors* 24.1 (2024): 286. ISSN: 1424-8220, pp. 1–15 https://doi.org/10.3390/s24010286 https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/286/pdf?version=1704850225
7. Павлин Граматиков, Джулиан Тахов. Проучване на земните недра с безпилотни летателни апарати. Proceedings SES'2024, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2024, ISSN:p-ISSN 2603 – 3, e-ISSN 2603 – 3321, pp. 122–127 http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202024_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/6_Gramatikov.pdf
8. Калагирева Карина, Павлин Граматиков. Европейската SBAS: алтернативата за инструментална система за кацане. Международна научна конференция по "Авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии", Транспортен факултет, БулТранс 2014, 17–19 септември, гр. Созопол, 2014 г, 2014, ISSN: 1313-955X, pp. 49–54 https://bultrans.org/files/proceedings/bultrans-2014.pdf

ПОВИШАВАНЕ ТОЧНОСТТА ПРИ ИЗМЕРВАНЕ РАЗСТОЯНИЕТО ДО ВУЗДУХОПЛАВАТЕЛНО СРЕДСТВО ПРИ КАЦАНЕ, С ПРИЛОЖЕНИЕ НА МНОГОПОЗИЦИОННА ЛОКАЦИЯ

София Узунова, Михаил Желязов

Технически Университет – София
e-mail: suzunova@tu-sofia.bg, mikael@tu-sofiq.bg

Ключови думи: *многопозиционна радиолокация; публикувана траектория; подход към летището; данни за местоположението*

Резюме: *В доклада е описан метод за валидиране на на ADS-B сигнали чрез използване на многопозиционна радиолокация За целта беше създадена среда за симулация и софтуерен пакет в MATLAB. Симулационната среда моделира базова ситуация, която определя разстоянието до входящо въздухоплавателно средство по известна траектория за подход към летището, и ситуация с добавяне на противник. Избрано е международно летище Васил Левски – София (LBSF) и публикувана траектория за подход (MOREK 4H), за реален сценарий при кацане с две величини на данните за местоположението на летателния апарат.*

IMPROVING THE ACCURACY OF MEASURING AIRCRAFT DISTANCE DURING LANDING USING MULTISTATIC RADAR

Sofia Uzunova, Mihail Zhelyazov

Technical University – Sofia
e-mail: suzunova@tu-sofia.bg, mikael@tu-sofiq.bg

Keywords: *multistatic radar; published trajectory; airport approach; position data*

Abstract: *This report presents a method for validating ADS-B signals through the application of multistatic radar. For this purpose, a simulation environment and a MATLAB-based software package were developed. The simulation models a baseline scenario that determines the distance to an inbound aircraft on a published approach trajectory to the airport, as well as a scenario including a potential adversary. The selected case study involves Vasil Levski International Airport – Sofia (LBSF) and the published approach trajectory MOREK 4H, representing a realistic landing scenario with two sets of aircraft position data.*

Въведение

Методът се базира на симулация, която моделира теоретичен полет на самолет, докато той следва траекторията на подхода и излъчва местоположението си над ADS-B. Данните са симулирани, за определяне на основната точност при моделиране чрез многопозиционна радиолокация. След като е определена базовата линия, в симулацията е въведен противник. Сценарият на противника е конфигуриран да моделира ситуация на измама. По-конкретно, противникът ще излъчва ADS-B пакети данни, за да създаде „призрачен“ самолет по вектора на подхода MOREK 4H. Системният модел ще вземе излъченото местоположение и ще го сравни с местоположението, предоставено от изчислението на многопозиционната радиолокация. Ако разликата между местоположението на ADS-B и изчисленото местоположение е по-голяма от базовия праг, точката ще бъде маркирана като подозрителна.

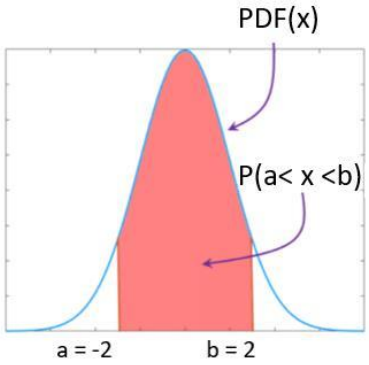
Тази конфигурация е симулирана с 4 различни топологии на приемната кула ADS-B. Кулите в сценарии 1 – 3 образуват равностранни триъгълници и са строго теоретични, докато сценарий 4 разполага трите кули и основните летища в България.

Теория на метода

EASA не документира публично къде съществуват ADS-B приемни кули поради мерки за националната сигурност. Въз основа на това ограничение бяха избрани теоретични местоположения в страната. Голяма част от симулацията се фокусира върху триъгълна топология с LBSF в центъра на масата. В последния сценарий беше проучена по-реална ориентация, базирана на представянето на предишните симулационни повторения, които поставиха кулите на летище Пловдив, летище Варна и летище Бургас. Това позволи да се сравни правдоподобна топология от реалния свят.

Предполага се също, че всяка от кулите е оборудвана с Глобална Навигационна Сателитна Система за връзка с ВС, за да се възползва от сигнала на GPS часовника. Този сигнал осигурява изключително високо ниво на точност и е от жизненоважно значение за осигуряване на адекватно времево отбелязване.

Отчитане на местоположението чрез GPS: Местоположението на ADS-B разчита на GPS, за да предостави данни в реално време за съобщаване на местоположението на самолета. Въз основа на правителствения стандарт, осигурен от EASA, по-малко от 2 m точност трябва да се осигури в 95% от времето. Това ниво на шума на сигнала беше подредено в рамките на симулацията при допускането за разпределение на вероятността на Гаус. За да се приложи произволен шум на Гаус в средата на MATLAB, беше необходимо стандартното отклонение (δ) и средното (μ). Приемайки средна стойност нула, Уравнение 2 по-долу беше използвано за определяне на стандартното отклонение на шума. В тази ситуация a = -2 m и b = 2 m, както е показано на фигура 6.



Фиг. 1. Функция за нормална вероятностна плътност на шума на GPS местоположението

(1) $$P(a \le X \le b) = 1 - Q\left(\frac{\mu - a}{\delta}\right) - Q\left(\frac{b - \mu}{\delta}\right)$$

$$0.95 = 1 - Q\left(\frac{0-(-2)}{\delta}\right) - Q\left(\frac{2-0}{\delta}\right)$$

$$0.95 = 1 - Q\left(\frac{2}{\delta}\right) - Q\left(\frac{2}{\delta}\right)$$

$$2Q\left(\frac{2}{\delta}\right) = 0.05; \qquad Q\left(\frac{2}{\delta}\right) = 0.025$$

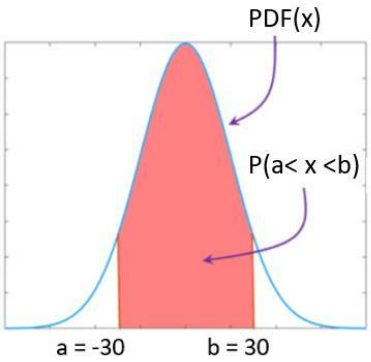
Q (2.805) ≈ 0.025 (Изчислено чрез Q-таблици в ПРИЛОЖЕНИЕ A: Таблица за търсене на Q-функция)

$$\delta = \frac{2}{2.805} = 0.713\ m,$$

където, δ е стандартното отклонение, а μ е средното отклонение.

Използвайки изчисленото стандартно отклонение (δ) и приетата средна стойност, допълнителният шум от данните за GPS местоположението може да бъде добавен в симулационната среда за по-реалистичен модел.

Синхронизиране на GPS часовник: За да се извършат правилно изчисленията на многопозиционната радиолокация, по-специално частта за маркиране на времето, всяка от кулите трябва да използва един и същ часовников сигнал. За тази симулация е използван часовник, базиран на GPS, както и документираното ниво на точност. Това позволи на шума от реалния свят да влезе в симулацията, за да осигури по-точно представяне на приложението. Въз основа на публикувания стандарт, GPS часовникът е точен до по-малко от 30 ns, 95% от времето [1,2,3]. Приемайки гаусово разпределение на шума, уравнение 2 беше използвано за определяне на стандартното отклонение (δ) с нулева средна стойност (μ). В тази ситуация a = -30 ns и b = 30 ns, както е показано на фигура 2.



Фиг. 2. Функция за нормална вероятностна плътност на шума на GPS часовника

(2) $$P(a \le X \le b) = 1 - Q\left(\frac{\mu - a}{\delta}\right) - \left(\frac{b - \mu}{\delta}\right)$$
$$0.95 = 1 - Q\left(\frac{30}{\delta}\right) - Q\left(\frac{30}{\delta}\right)$$
$$2Q\left(\frac{30}{\delta}\right) = 0.05$$
$$Q\left(\frac{30}{\delta}\right) = 0.025$$
$$Q(2.805) \approx 0.025$$
$$\delta = \frac{30}{2.805} = 10.695ns$$

където, δ е стандартното отклонение, а μ е средното отклонение.

След това тази информация беше използвана в софтуера MATLAB, за да се добави шум от GPS часовника към създаването на времева марка, когато бяха получени ADS-B пакетите.

Трябва да се отбележи, че много вътрешни закъснения (оборудване, предаване, изчисление и т.н.) могат да бъдат добавени към симулационния модел за по-нататъшно внедряване на системата в реалния свят. В рамките на тази симулация не са взети предвид никакви други закъснения или шум на сигнала, освен GPS местоположението и синхронизирането на GPS часовника.

Изчисляване многопозиционната локация и подходния маршрут на симулацията

За да се определи теоретичното 2-D местоположението на сигнала, са необходими три вида информация, включително координатите X-Y на всяка кула и съответния времеви маркер на получения сигнал. Въз основа на уравнение 1, от Чан [17], местоположението на сигнала е получено.

(3) $$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} * \left\{ \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{3,1} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} {r_{2,1}}^2 - K_2 + K_1 \\ {r_{3,1}}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\}$$

където::

$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ = изчисленото местоположение на сигнала

$x_{i,1}$ = разстоянието между кула i и кула 1 в координатата x

$y_{i,1}$ = разстоянието между кула i и кула 1 в координатата y

$r_{i,1}$ = разстоянието между кула i и кула 1

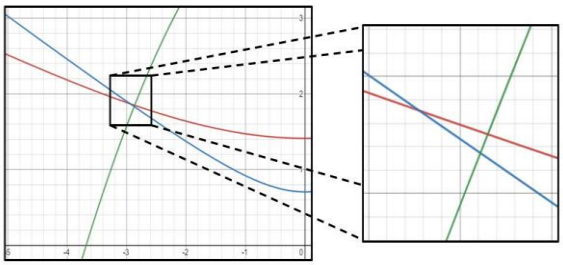
$r_i{}^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$

$K_i = {x_i}^2 + {y_i}^2$

Само две величини бяха избрани да бъдат изследвани въз основа на ограничения ефект, при който височината на ЛА би имала върху цялостното изчисление на многопозиционната локация, значителното увеличение на сложността на необходимия 3-D алгоритъм и добавянето на четвърта приемна кула в рамките на системата. Например, в началото на моделираната траектория на подхода, която е изследвана, височината на самолета трябва да е близо до 17 000 фута, но все пак да е на разстояние, повече от 500 000 фута от местоназначението си. Това се равнява на ~97% тежест на координатите на географската ширина и дължина (x, y) срещу ~3% тежест на стойността на надморската височина (z).

Освен това, когато се приложи аритметиката за извършване на 3-D изчисление на многопозиционната локация, сложността на изчислението се увеличава поради множеството пресичания, които произвеждат 3те хиперболични уравнения [4]. След това е необходим детерминистичен модел, за да се определи коя от точките на пресичане е най-вероятно

правилната, тъй като местоположението им рядко се намира съвместно. Пример може да се види на Фигура 3, илюстрираща най-често срещания сценарий с 3 възможни пресичания. И накрая, физическото изпълнение на симулацията също би изисквало добавяне на допълнителна кула към системата. Въз основа на тези фактори и субективно ограничената полза при определяне на надморската височина на източника на ADS-B сигнала, беше изследвана само двуизмерна симулация.



Фиг. 3. Пресечни точки на 3 хиперболични уравнения

За да се основе симулацията в реалността, действителният път на подход към LBSF беше избран като базова линия и противников вектор. MOREK 4H, показан на фигура 4, е един от многото подходи, публикувани от Bulatsa. Този вектор е точно представяне на типа движение на търговският самолет по време на кацане. Фиг. 4 показва различните сегменти от пътя на подхода, като посочва минималната надморска височина (ft), навигационния курс (в градуси) и дължината (в морски мили).

Освен това скоростта на подхода варира в зависимост от частта от подхода. Когато ЛА се приближи до кацане, скоростта се коригира въз основа на препоръките на УВД [5]. Тази информация беше използвана в рамките на симулацията, за да помогне за дефинирането на потока от данни на двата ADS-B пакета за местоположението (2 Hz).

Фиг. 4. Маршрут на подход MOREK 4H [21]

За добавяне на влиянието на „противник“, трябва да се определи праг, който да позволи на УВД да „маркира“ пакета с данни за местоположението като „подозрителен“. Това ще бъде сравнението между докладваното местоположение на ADS-B и изчисленото местоположение на многопозиционната локация. Ако разликата между двете групи от данни в конкретен времеви момент е по-голяма от праговата стойност, това ще означава, че сигналът е бил „подправен“.

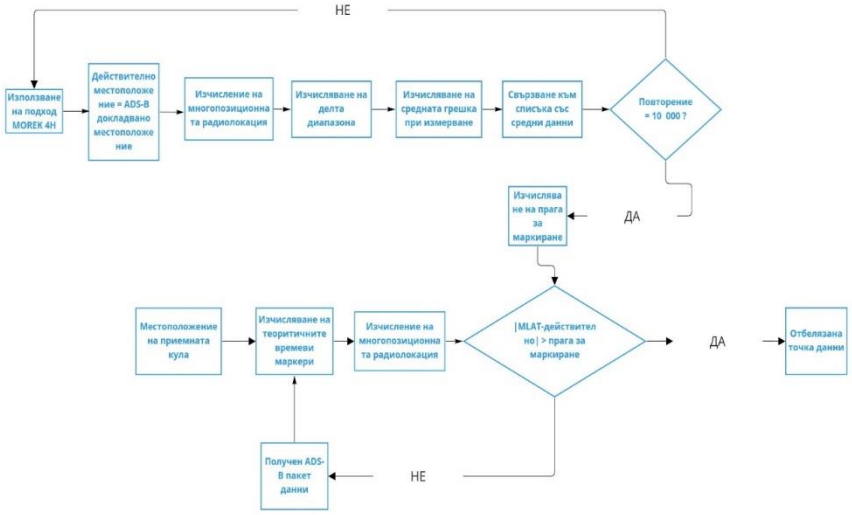
За да се определи прагът за маркиране, който ще бъде приложен по време на частта от симулацията при добавяне на противник, беше проведено проучване на базовата производителност. Всеки сценарий беше повторен 10 000 пъти, за да се определи средната грешка при измерване и стандартното отклонение на точките от данни. Приемайки базова производителност от 99% (<=1% фалшиво маркиране) и потвърдено гаусово разпределение на вероятностите, прагът за маркиране беше определен с помощта на Q-функцията [6].

(4) $$0.99 = 1 - Q\left(\frac{b}{\delta}\right) \ ,$$

където: δ - стандартно отклонение.

След като тази стойност беше определена, тя беше използвана при добавянето на противник, за да се определи как стационарен и движещ се противник ще повлияе върху производителността на модела за всяка топология на кулата.

Базова производителност – Взето е решение за изчисляване на прага на маркиране на базовата линия за подход със специфична топология на приемната кула. След като прагът беше определен, стойността беше използвана, за да се определи дали полученият ADS-B пакет данни за местоположението на ЛА е бил подправен от противника. В модела беше изследван неподвижен, и движещ се „противник“. Освен това, с всеки различен сценарий, топологията на приемните кули се променя, за да се определи дали има промяна в производителността. Основна блок-схема на симулационния модел може да се види на фиг. 5.



Фиг. 5: Диаграма на симулацията

Както се вижда на Фигура 5 и е посочено кода за симулация на MATLAB – „Създаване на подхода на MOREK 4H“, симулацията създава пътя на подхода на MOREK 4H, който да се използва като „действителни“ данни за местоположението. След това данните за местоположението от ADS-B се създават чрез добавяне на шума на GPS местоположението към данните за действителното местоположение. След това алгоритъмът MLAT, работещ по израз (1) и споменат в „код за симулация на MATLAB – изчисляване разликата във времето на пристигане“, се използва за определяне на изчисленото местоположение на всяка точка от данни, въз основа на изчислените шумови времеви маркери. След това стойността на грешката на измерване във всяка точка се изчислява, като се вземе средноквадратичното между местоположението на MLAT и данните за местоположението, излъчени от ADS-B. След това се изчислява средната грешка на измерване за цялата траектория на подхода.

Цялата тази последователност се повтаря 10 000 пъти – код за симулация на MATLAB – „Базова производителност“, за да се получи голям размер на извадката от информация и да се определи средната стойност на грешката при измерване на базовата линия и стандартното отклонение. След това средната стойност и стандартното отклонение се използват за изчисляване на прага за маркиране въз основа на 99% стойността на производителност (< 1% от фалшиво положително) за базовите условия. Например, ако известен реален самолет следва подхода на MOREK 4H, тогава 99% от времето данните за неговото местоположение няма да бъдат маркирани.

След като този праг за маркиране е определен, симулацията след това обработи както базовите, така и данните за противниковото добавяне и съответно ги маркира.

Добавяне на противник: Въз основа на прага за маркиране, определен в рамките на базовата симулация, в системата са поставени неподвижен и движещ се противник, „код за симулация – добавяне на стационарен противник“ и „код за симулация – добавяне на движещ се противник“. Всеки противник беше разположен на 10 km директно на север от центъра на LBSF, като стационарният противник остана на място, а движещият се е поставен на случайно генериран път. Движещият се противник е моделиран по образец на наличен в търговската мрежа дрон. Генерираният произволен път използва постоянна скорост от 80 km/h и винаги започва излъчването си от същия източник като стационарния противник.

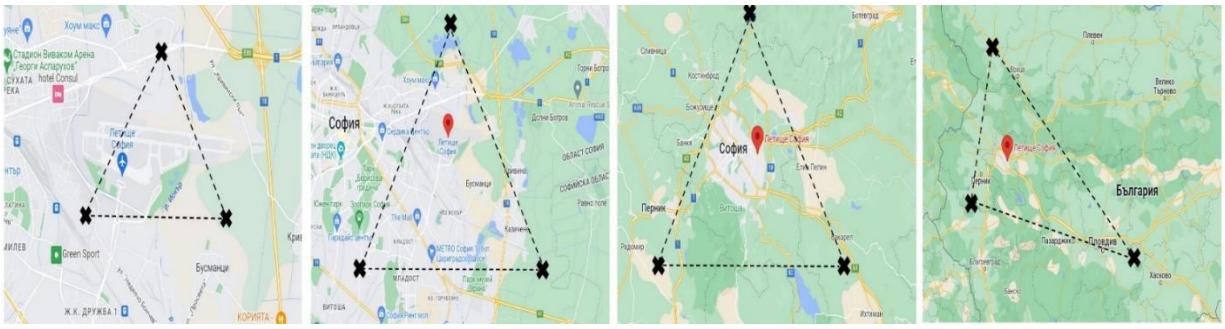
Във всяка точка от потока от данни ADS-B моделът сравнява изчисленото местоположение на MLAT и докладваното местоположение на ADS-B. Ако разликата между

двете точки е по-голяма от конкретния праг за маркиране, тогава моделът ще маркира данните за местоположение като подозрителни.

След като симулацията предостави всички данни за местоположението, ефективността е измерена като двоична скала (1 = маркирано успешно, 0 = неуспешно маркирано).

*План на симулацията*Настройката за всеки сценарий на симулацията е идентична с изключение на местоположението на приемните кули. Тази отделна променлива беше модифицирана, за да се определи какъв вид насоченост може да бъде извлечена, когато местоположенията на кулите са променени. Въз основа на триъгълния характер на конфигурацията, най-простата форма за създаване беше равностранен триъгълник, който се центрира около центъра на LBSF. Сценарий 1–3 остана в съответствие със същата форма, но се увеличи общия размер на триъгълника, за да се наблюдава как се променя грешката на измерване на модела. Сценарий 4 се отклони от тенденцията на формата чрез моделиране на по-вероятна топология чрез поставяне на кулите на 3 летища в България: Фиг. 6. Както се вижда на фигурата, това доведе до промяна формата на създадения триъгълник и общия размер.

Всяка топология служи като базова линия, за да се определи грешката на измерване на модела и прагът на маркиране, който беше изчислен, за да се определи производителността по време на добавянето на противника.



Фиг. 6. Топология на приемните кули

Заключение

В заключение може да се каже, че е предложен иновативен метод за валидиране на ADS-B сигнали чрез използване на многопозиционна радиолокация За целта е създадена среда за симулация и софтуерен пакет в MATLAB. В симулационната среда се моделира базова ситуация, която определя разстоянието до входящ ЛА по известна траектория за подход към летището, и ситуация с добавяне на противник. Избрано е международно летище Васил Левски - София (LBSF) и публикувана траектория за подход (MOREK 4H), за реален сценарий при кацане с две величини на данните за местоположението на летателния апарат.Извършен е преглед на симулацията за валидиране на ADS-B сигнали чрез използване на многопозционна локация. Избрано е летище и траектория за подход, както и е направен избор за топология на приемните ADS-B кули. Взети са предвид и са изчислени стандартните отклонения от смущенията в GPS местоположението и времевия сигнал.

Благодарности:

Научните изследвания и резултатите в настоящата публикация са финансирани от проект по НИС на ТУ – София - 2024 г „В помощ на докторанта“ № 242ПД0018-04.

Литература:

1. M. Richards, J. Scheer and W. Holm, Principals of Modern Radar, Edison: SciTech Publishing, 2010
2. Зависимые кооперативные системы ADS-C и ADS-B// Портал магистров Электронный ресурс].URL:http://masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/ind/index.html
3. Режим S//Тема Режим S [Электронный ресурс]. URL: http://nenuda.ru/тема-14-режим-s-ворл.html
4. Система и способ обеспечения безопасности полетов и/или управления полетами ЛА / Patent US2471245, Ломенхофер Хельмут, Нойфельдт Хольгер, 27.12.2012, 4–5 с.
5. What is the difference between ADS-B Out and ADS-B In? // The Balance, Aviation [Электронный ресурс]. URL: https://www.thebalance.com/what-sthe-difference-between-ads-b-out-and-ads-b-in-282562
6. J. Sun, The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals, TU Delft OPEN Publishing, 2020.

РЕЗУЛТАТИ СЛЕД СИМУЛАТИВНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДА ЗА ВАЛИДИРАНЕ НА ADS-B СИГНАЛИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА МНОГОПОЗИЦИОННА ЛОКАЦИЯ

София Узунова, Михаил Желязов

Технически Университет – София
e-mail: suzunova@tu-sofia.bg, e-mail: mikael@tu-sofiq.bg

Ключови думи: *многопозиционна радиолокация; публикувана траектория; подход към летището; данни за местоположението*

Резюме: *В доклада е направи анализ и оценка на грешките, допускани при прилагане на метода за повишаване на точностните характеристики при измерване на разстоянието до ВС с използване на многопозоционна локация. Системата от този тип е отворена, което означава, че са възможни подобрения и по-нататъчно развитие. Ограничение на изследването е елиминирането на стойността на надморската височина (z). Чрез намаляване на информацията за местоположението до 2-D, системата е податлива навъздействие при вероятни „противници“, следващи същия маршрут, но на различна надморска височина. Изследването на триизмерния анализ би осигурило повече сигурност на метода за валидиране на многопозиционната локация. Но това ще изисква поне 4 сигнални кули, за да се синтезира допълнителната величина в пространството.*

RESULTS AFTER A SIMULATION STUDY OF THE ADS-B SIGNAL VALIDATION METHOD USING MULTI-POSITION LOCATION

Sofia Uzunova, Mihail Zhelyazov

Technical University – Sofia
e-mail: suzunova@tu-sofia.bg, e-mail: mikael@tu-sofiq.bg

Keywords: *multi-position radar; published trajectory; approach to the airport; location data*

Abstract: *The report analyzes and evaluates the errors made when applying the method for increasing the accuracy characteristics when measuring the distance to the aircraft using multi-position location. The system of this type is open, which means that improvements and further development are possible. A limitation of the study is the elimination of the altitude value (z). By reducing the location information to 2-D, the system is susceptible to interference from potential "adversaries" following the same route but at a different altitude. The study of three-dimensional analysis would provide more certainty to the method for validating multi-position location. However, this would require at least 4 signal towers to synthesize the additional quantity in space.*

Въведение

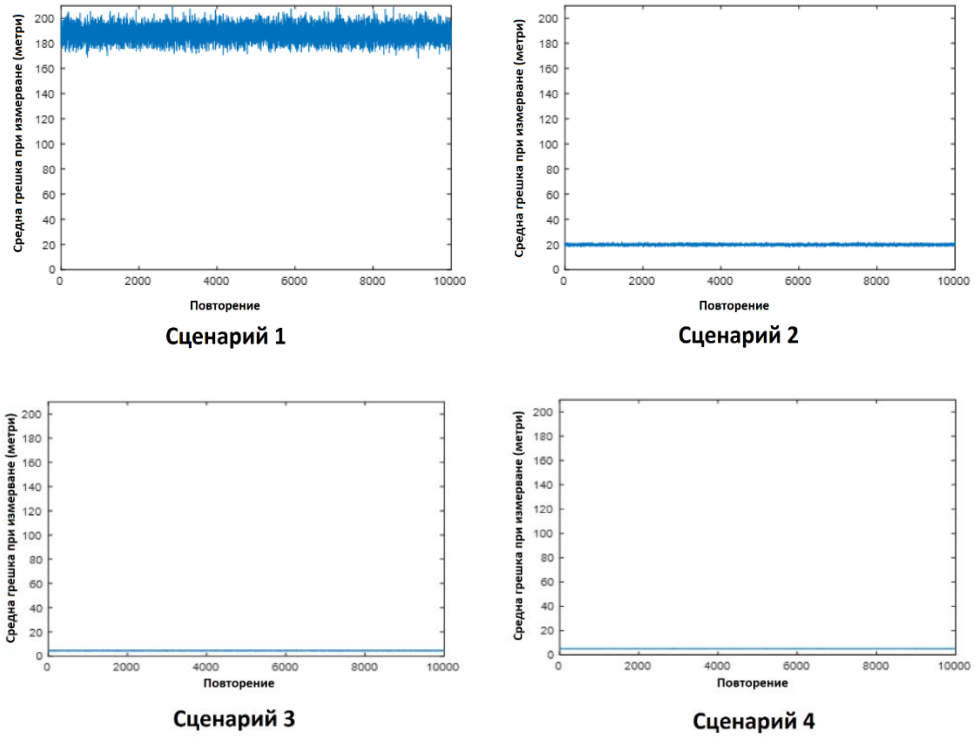
След като бяха изпълнени 10 000 повторения на всеки сценарий, средната грешка при измерване беше записана, за да се определи дали може да се извлече някаква тенденция. Фиг. 1 показва как всяко повторение на подхода към базовата линия варира в средната грешка на измерване. За допълнително илюстриране на разпределението на средната грешка при измерване е показана хистограма на Фиг. 2.

Изложение

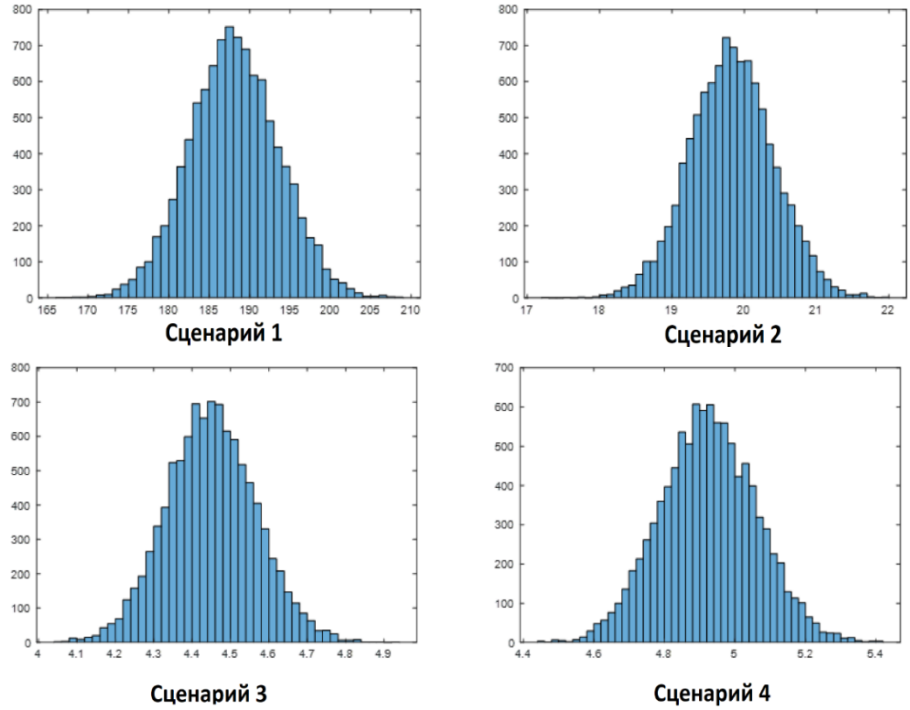
Базова линия – резултати: Разпределението, което се вижда на фигура 2, е в съответствие с нормална камбанообразна крива или Гаусово разпределение на вероятностите, със средна стойност в центъра. Резултатите, показани в таблица 1, показват тенденция в средната грешка на измерване между сценарии 1, 2 и 3. Единствената модификация,

направена между всяко от тези изпитвания, е размерът на триъгълника, образуван от приемните кули. Тези резултати показват, че тъй като кулите са били по-далеч една от друга, средната грешка при измерване е намалена.

В сценарий 4 приемните кули са поставени на 3 големи летища. Производителността на тази топология беше подобна на сценарий 3, но с малко по-висока средна грешка при измерване. Размерът на създадения триъгълник беше по-голям от всеки друг сценарий, но съдържаше различна форма. Може да се приеме, че размерът на създадения триъгълник не е единственият фактор, който влияе върху изчислението при многопозиционната локация и върху формата.



Фиг. 1. Средна грешка при измерване (метри) за повторение



Фиг. 2. Разпределение на средната грешка при измерване

Таблица 3. Резултати от грешка при измерване на базовата линия

Сценарий	Средна грешка при измерване (m)	Грешка при измерване Нормално отклонение (m)
1	188.08	5.54
2	19.83	0.58
3	4.45	0.12
4	4.92	0.14

Праг на маркиране – резултати: След като производителността на базовата линия беше характеризирана, средната грешка на измерване и нормалното отклонение бяха използвани за определяне на прага за маркиране, който щеше да се използва по време на частта за добавяне на противник на всеки сценарий. За да се определи праговата стойност, трябва да се установи 99% ниво на ефективност на базовата линия. Това би гарантирало, че ако действително въздухоплавателното средство пътува през въздушното пространство и докладва позицията си над ADS-B, тогава по-малко от 1% от точките с данни за местоположението му ще бъдат маркирани (т.е. фалшиви положителни резултати).

За да се определи прагът за маркиране, ще бъде добавено отместване към средната грешка на измерване въз основа на базовото разпределение на повторенията.Въз основа на разпределението на Гаус на данните за средната грешка на измерване беше създадено уравнение на Q-функция за определяне на приложимото отместване. Използвайки уравнение 3, алгоритъма на обратната Q-функция на MATLAB и известното стандартно отклонение (δ), беше създадено общо уравнение за определяне на прага на маркиране, както се вижда в уравнение 4.

(1) $$0.99 = 1 - Q\left(\frac{\text{изместване}}{\delta}\right)$$

$$Q\left(\frac{\text{изместване}}{\delta}\right) = 0.01$$

$$\frac{\text{изместване}}{\delta} = Q^{-1}[0.01]$$

$$\text{изместване} = \delta * Q^{-1}\,[0.01]$$

(2) $$\text{праг за маркиране} = \text{средна грешка при измерване} + \text{изместване}$$

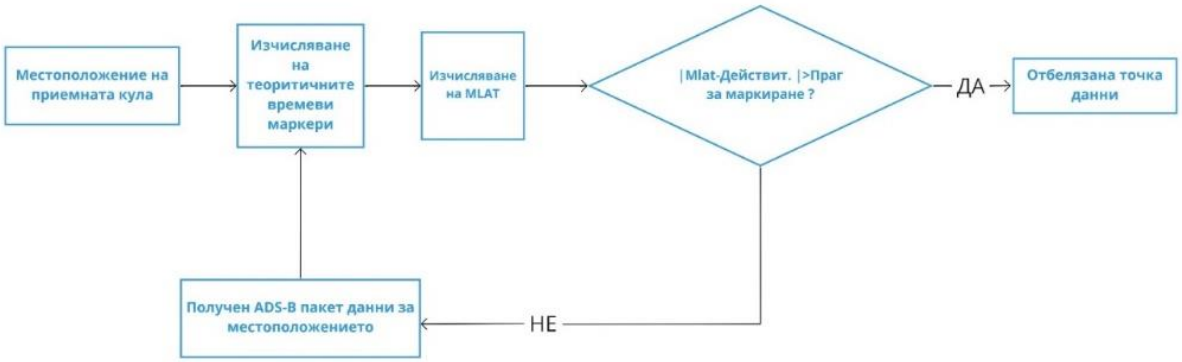
Чрез уравнение (2) са определени изместването и прагът за маркиране за всеки сценарий, показани в табл. 2. Тези стойности са основните резултати от анализа на базовата линия. Тези параметри позволиха на противниците да бъдат добавени в симулацията, за да се определи наистина дали MLAT може да бъде жизнеспособно средство за валидиране на данни за местоположението във въздуха от ADS-B предаване.

Таблица 4. Прагове за маркиране

Сценарий	Изместване на маркирането (в метри)	Праг за маркиране (в метри)
1	12.87	200.95
2	1.34	21.17
3	0.27	4.72
4	0.32	5.24

Добавяне на „стационарен противник“: След като прагът за маркиране за всеки модел/сценарий беше определен, производителността на системата може да бъде проучена чрез добавяне на противник, както е показано на Фиг. 3. Първо, стационарният противник беше проучен чрез създаване на противник на 10 km северно от центъра на LBSF. Това местоположение е избрано, защото е извън периметъра на LBSF, в леснодостъпна зона за всеки. След това всеки сценарий беше синтезиран с произхода на сигнала на ADS-B предаването, излъчвано от местоположението на стационарния противник [1, 2]. Моделът сравнява изчисленото местоположение на многопозиционата радиолокация с излъченото местоположение на ADS-B и ако двата източника варират с повече от прага за маркиране на сценария, тогава точката от данни ще бъде маркирана като подозрителна.

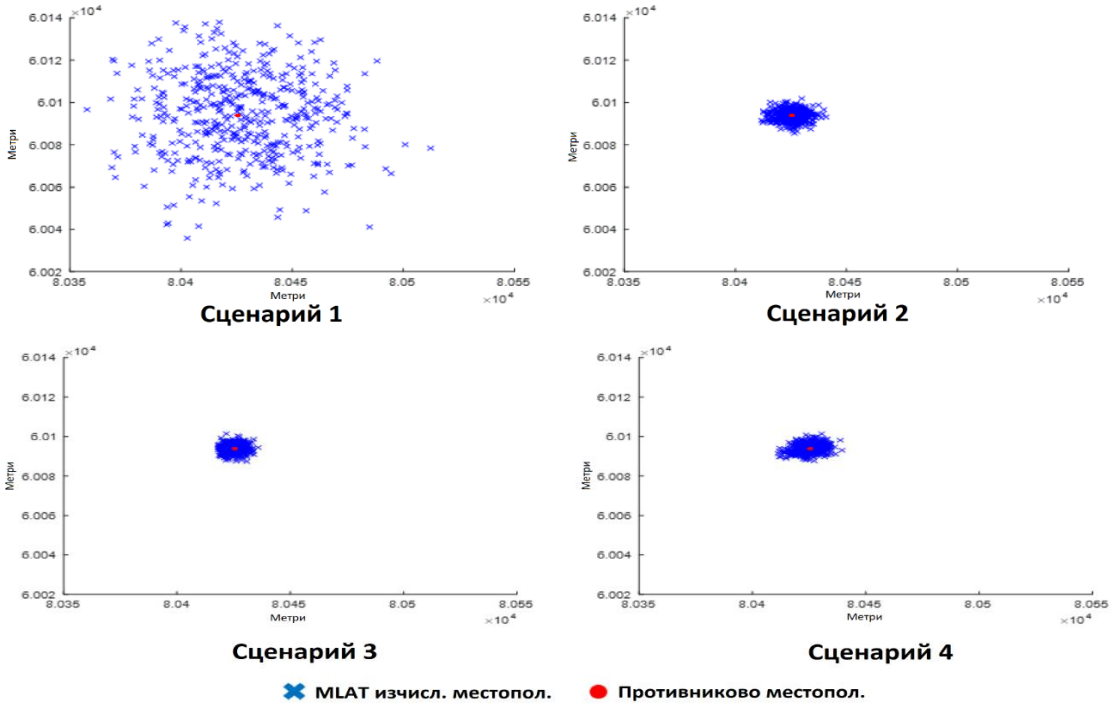
В края на постановката беше определена стойността на „ефективност на покритие“ въз основа на количеството маркирани точки от данни спрямо общия брой точки. Тъй като всички данни се излъчват от местоположението на противника, тогава моделът трябва да маркира всички точки от данни за пълно покритие.



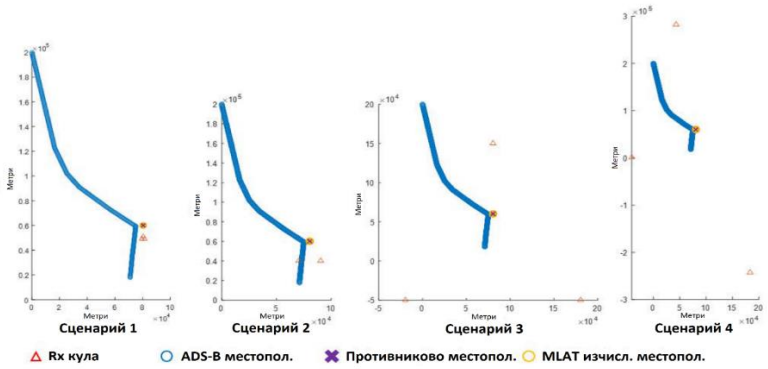
Фиг. 3. Блок-схема на алгоритъма при добавяне на стационарен „противник”

Фиг. 4. показва местоположението на изчислението при многопозиционна локация – в синьо, спрямо действителното местоположение на „противника“ – в червено. Фиг. 5 илюстрира пълният сюжет на симулацията, включително излъчената траектория на подхода – в синьо, местоположенията на приемната кула – в червено, действителното местоположение на противника в лилаво и местоположението на изчисления сигнал в жълто. Следователно Фиг. 4 е увеличените данни на лилавите и жълтите точки с данни на Фиг. 5. Трябва да се отбележи, че в Сценарий 1 приемните кули за многопозиционната локация са разположени достатъчно близо, за да изглеждат съвместно разположени. Това е само ограничение на графичния изход от симулацията и не отразява действителната настройка.

Фиг. 5 показва, че изчислените местоположения на многопозиционната локация не се припокриват с излъчената траектория на подхода в рамките на сценарии 1–2. Сценарии 3–4 показват известно припокриване, но най-вероятно то е причинено от ограничение в пропорцията на чертане на MATLAB. За обективно определяне на ефективността на покритието на системния модел бе завършено сравнението на праговете за маркиране.



Фиг. 4. Местоположение на „противника“ спрямо MLAT местоположението



Фиг. 5. Пълна диаграма при добавяне на „стационарен противник“

Таблица 5 показва ефективността на покритието на всеки сценарий за добавяне на стационарен противник. Тъй като данните за местоположението на ADS-B се излъчват от местоположение, което е различно от излъченото местоположение, се очаква всички точки от данни да бъдат маркирани, което съответства на 100% ефективност на покритие. Всички сценарии 1–4 успяха да осигурят 100% покритие при идентифициране на фалшиви данни за местоположение с помощта на MLAT.

Таблица 5. Покритие при стационарен противник

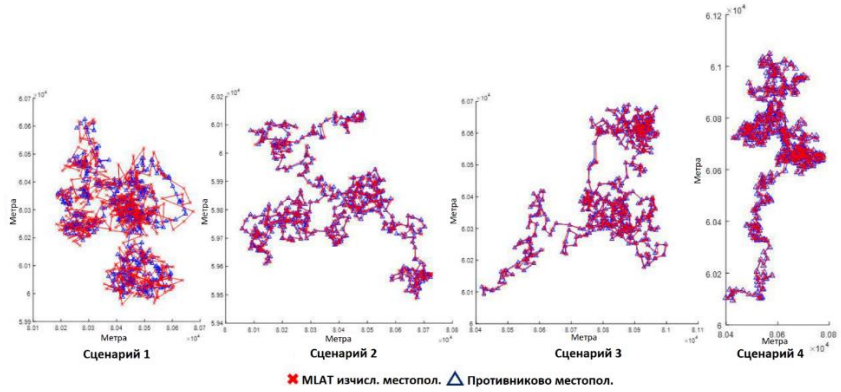
Сценарий	Точки за данни от местопол.	Подправени точки	Маркирани точки от данни	Ефективност на покритие (%)
1	485	485	485	100
2	485	485	485	100
3	485	485	485	100
4	485	485	485	100

*Резултати при „движещ се противник“: П*одобно на „стационарния противник“, маркиращите прагови стойности са използвани за измерване на ефективността на модела спрямо движещ се противник. Противникът е моделиран като лице, което е модифицирало наличен в търговската мрежа дрон, който да позволи мобилно ADS-B излъчване. Пътят на дрона е моделиран като случаен с постоянна скорост от 22 m/s (80 km/h).

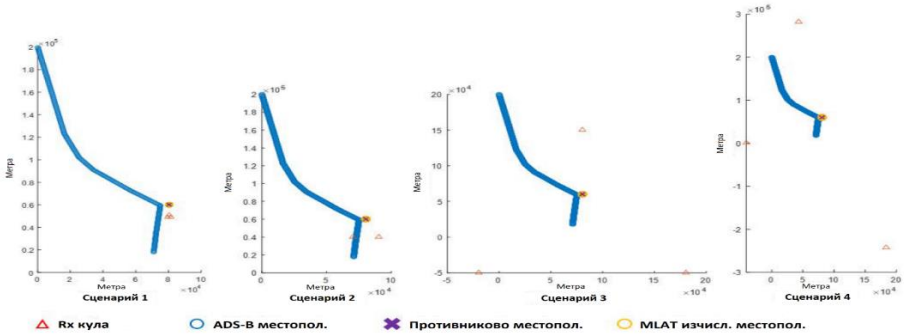
Фиг. 6 показва връзката между действителното местоположение на движещия се противник спрямо изчисленото местоположение, предоставено от алгоритъма MLAT. Сценарии 1–3 демонстрират намаляването на средната грешка при измерване на всеки опит чрез припокриване на точките от данни във всяка диаграма. Сините триъгълници представляват действителното местоположение на противника, а червените X представляват изчисленото местоположение на функцията MLAT. Между всеки сценарий точките от данни започват да се сближават и почти се припокриват при сценарий 3. Сравнението между действителното и изчисленото местоположение в сценарий 4 е почти идентично със сценарий 3. Както се очаква, това се основава на средната грешка на измерване на двата сценария, които са почти равни.

Фиг. 6 илюстрира пълния план на симулацията, включително излъчената траектория на подхода в синьо, местоположенията на приемната кула в червено, действителното местоположение на противника в лилаво и местоположението на изчисления сигнал в жълто. Както при резултатите от стационарен противник, Фиг. 6. е увеличените данни на лилавите и жълтите точки от данни на Фиг. 7.

Фиг. 7 показва, че изчислените местоположения на MLAT не се припокриват с излъчваната траектория на заход в рамките на сценарии 1–2. Подобно на добавянето на стационарен противник, сценарии 3–4 показват известно припокриване, но най-вероятно е причинено от ограничение в съотношението на графиката. Сравнението на маркиращия праг отново беше завършено, за да се определи обективно ефективността на покритието на системата.



Фиг. 6. Действително местоположение спрямо MLAT изчислено местоположение на движещ се противник



Фиг. 7. Пълна диаграма при добавяне на „движещ се противник“

Таблица 6 показва ефективността на покритието на всеки сценарий, когато движещ се противник е добавен в системата. Тъй като сигналът ADS-B произлиза от местоположение, различно от местоположението на излъчване, се очаква всички точки от данни да бъдат маркирани, което съответства на 100% ефективност на покритие. Използвайки MLAT, системният модел успя да осигури 100% покритие при идентифициране на фалшиви данни за местоположение в рамките на сценарии 1–4.

Таблица 6. Покритие при движещ се противник

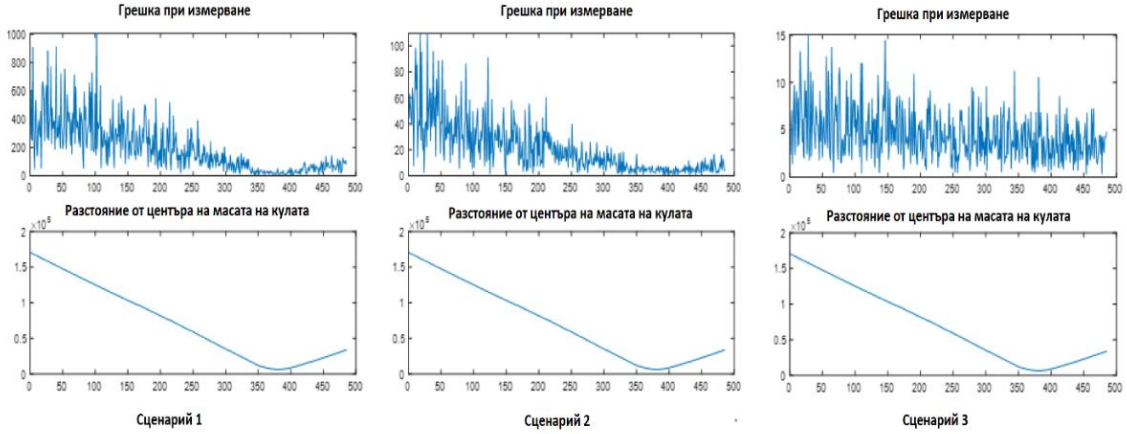
Сценарий	Точки за данни от местопол.	Подправени точки	Маркирани точки от данни	Ефективност на покритие (%)
1	485	485	485	100
2	485	485	485	100
3	485	485	485	100
4	485	485	485	100

Трябва да се отбележи, че местоположението на противника никога не е било съвместно с данните за местоположението на ADS-B, които се излъчват. Ако тази ситуация беше представена и местоположението на противника беше в рамките на прага за маркиране, тогава нямаше да бъде маркирано правилно. Тази ситуация не е наблюдавана, тъй като стационарният противник ще има само една точка от данни, която няма да бъде маркирана правилно, т.е. когато местоположението на ADS-B е в обсега с действителното местоположение на противника [3, 4].

До този момент СУВД щеше да маркира фалшивия самолет поради предварително маркираните точки от данни в рамките на неговия път на подход. Освен това движещият се противник би имал подобна производителност въз основа на ограничената скорост на дрона (22 m/s). Въз основа на началната скорост на подхода (107 m/s) и крайната скорост на подхода (72 m/s) на търговски самолет и скоростта на предаване от 2 Hz, ще бъдат получени само 1 – 2 точки от данни за местоположение, които няма да бъдат отбелязани. Единственият реалистичен начин, по който дрон може да заблуди системата, е да се движи по излъчвания си път със скорост, близка до тази на търговски самолет.

И накрая, поради силно повтарящият се характер на симулацията, бяха наблюдавани само малко количество топологии на кули. Въз основа на Сценарий 1–3, който съдържа

конфигурация на равностранен триъгълник, има силна зависимост между разстоянието от центъра на масата на кулата и грешката на измерване, както е показано на Фигура 19. Освен това, тъй като разстоянието между кулите е увеличено в рамките симулацията, средната грешка при измерване намалява. Въз основа на тези два резултата може да се заключи, че вероятно има идеално разстояние между кулите, което ще доведе до най-малко количество грешки и с център на масата около източника на получения сигнал.



Фиг. 8. Грешка при измерване и съотношение на разстоянието от центъра на кулата

Заключение:

Базовият симулационен модел предостави средна грешка при измерване между 188,08 и 4,45 m. Чрез симулиране на базовата настройка в продължение на хиляди повторения беше създадено разпределение на производителността, за да се определи каква стойност ще се използва, за да се позволи 99% точност при откриването на подозрителни сигнали. След като тази стойност беше определена, тя беше използвана в сценарии за добавяне на противник и успя да коригира идентифицирането на подозрителни сигнали в 100% от времето, както се вижда в таблица 7. Въз основа на тези резултати MLAT е обещаващо средство за валидиране на местоположението на ADS-B данни. Въз основа на работата на симулирания модел може да се приеме общо правило.

Таблица 7. Резултати от ефективността на симулацията

Сценарий	Средна грешка при измерване (m)	Грешка при измерване, стандартно отклонение (m)	Праг за маркиране (m)	Ефективност на маркиране на противник (%)
1	188.08	5.54	200.95	100
2	19.83	0.58	21.17	100
3	4.45	0.12	4.72	100
4	4.92	0.14	5.24	100

Извод

Освен ако местоположението на противника, независимо дали е неподвижен или се движи, не е в рамките на праговото ниво на маркиране на излъчената ADS-B точка от данни, тогава моделът ще го маркира по подходящ начин. Дали противникът се движи по подобен път, или е неподвижен, няма отношение към модела, тъй като той приема всяка точка от данни като независимо изчисление, за да определи валидността.

Благодарности:

Научните изследвания и резултатите в настоящата публикация са финансирани от проект по НИС на ТУ – София - 2024 г. „В помощ на докторанта“ № 242ПД0018-04.

Литература:

1. M. Richards, J. Scheer and W. Holm, Principals of Modern Radar, Edison: SciTech Publishing, 2010
2. Зависимые кооперативные системы ADS-C и ADS-B// Портал магистров Электронный ресурс].URL:http://masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/ind/index.html
3. Режим S//Тема Режим S [Электронный ресурс]. URL: http://nenuda.ru/тема-14-режим-s-ворл.html
4. Система и способ обеспечения безопасности полетов и/или управления полетами ЛА / Patent US2471245, Ломенхофер Хельмут, Нойфельдт Хольгер, 27.12.2012, 4–5 с.

МОДЕЛ НА ОТКАЗОЧУВСТВИТЕЛНА КАЛМАНОВА ФИЛТРАЦИЯ ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ОТКАЗИ В РАДИОКАНАЛИТЕ НА БЛА

Филип Илиев

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

Ключови думи: *БЛА (Безпилотен летателен апарат), Калманова филтрация, идентификация на откази, отказоустойчива филтрация, радиоканали, устойчива оценка*

Резюме: *Устойчивостта на радиоканалите за управление, която е критична за безопасната експлоатация, представлява основополагащ фактор за ефективното функциониране на безпилотни летателни апарати (БЛА). В статията е предложен концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация, който съчетава класическите методи за оптимално оценяване със специализирани механизми за идентификация и локализация на откази в радиоканалите. Моделът е ориентиран към повишаване на надеждността и устойчивостта при управлението на БЛА в реални условия, като в допълнение са разгледани възможностите за многоканална обработка и интеграция на диагностични блокове, които позволяват не само откриване, но и адаптивна реакция спрямо аномалии.*

MODEL OF FAULT-TOLERANT KALMAN FILTERING FOR FAULT IDENTIFICATION IN UAV RADIO CHANNELS

Filip Iliev

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

Keywords: *UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Kalman filter, fault detection, fault-tolerant filtering, radio channel failures, resilient estimation*

Abstract: *The resilience of control radio channels, being critical for operational safety, represents a fundamental determinant in the efficient functioning of unmanned aerial vehicles (UAVs). This paper proposes a conceptual model of fault-tolerant Kalman filtering that combines classical optimal estimation methods with specialized mechanisms for fault identification and localization in radio channels. The model is oriented toward enhancing the reliability and robustness of UAV control in real-world conditions, while additionally considering the possibilities for multi-channel processing and the integration of diagnostic blocks that enable not only fault detection but also adaptive response to anomalies.*

Въведение

Устойчивостта на каналите за радиоуправление е ключов фактор за сигурността и ефективността при използване на БЛА. Радиоканалите често са подложени на смущения, загуби на пакети или внезапни откази, които могат да доведат до влошаване на управлението, загуба на информация или до прекъсване на мисията. Това налага разработването на методи за своевременно откриване и идентификация на откази.

Класическата Калманова филтрация е доказан инструмент за оценка на състоянието на динамични системи в условия на шумове [1]. Въпреки това, тя е чувствителна към аномалии и откази в измервателните канали, което води до значителни грешки. Съвременните подходи за отказоустойчива филтрация предлагат резервиране, мултисензорна интеграция или адаптивни алгоритми, но често са с висока изчислителна сложност и ограничена ефективност при резки промени [3, 6].

Настоящата статия предлага **концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация**, комбиниращ многоканална дискретна филтрация с диагностични механизми, чувствителни към аномалии.

Постановка на проблема

Моделът се основава на синтез на алгоритми за многоканална дискретна филтрация с явно отчитане на динамиката на отказите, комбиниран с диагностични филтри, чувствителни към скокообразни изменения на параметрите. В рамките на предложената концепция се разглеждат три класа модели на параметрични откази – постоянни, случайни и Марковски, което позволява адаптивна модификация на коефициентите на Калман [4] в зависимост от надеждността на всеки канал. Концептуалният модел обединява задачите за идентификация на откази и оценяване на състоянието, осигурявайки устойчивост при аномалии като загуба на пакети, смущения или внезапна деградация на измервателните канали. Разгледани са и изчислителните аспекти на подхода, включително методи за намаляване на сложността при запазване на точността на оценяване. Предложеният модел създава основа за бъдещо развитие на отказоустойчиви архитектури за комуникация и управление при БЛА.

Калмановата филтрация представлява рекурсивен алгоритъм за оптимално оценяване на вътрешното състояние на динамични системи в условията на шум и неопределеност [2]. Основната ѝ цел е да осигури най-добра апостериорна оценка на състоянието на системата, като съчетава информацията от математическия модел на динамиката и наличните измервания. В този контекст оценката на състоянието се изчислява по формулата:

(1) $$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \ ,$$

където:

- $\hat{x}_{k|k-1}$ е прогнозата на състоянието;
- K_k е матрицата на усилването;
- y_k е измерването;
- H е матрицата на наблюдението.

При наличие на нелинейности, стандартният филтър се заменя с разширен Калманов филтър [5], при който оценката се актуализира чрез линеаризация около работната точка:

(2) $$\hat{x}_{k|k} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_{k-1}) + K_k(y_k - h(\hat{x}_{k|k-1})) \ ,$$

където $f(\cdot)$ и $h(\cdot)$ описват съответно нелинейната динамика и нелинейното измерване.

За повишаване на устойчивостта при резки изменения може да се използва и експоненциално-претеглена Калманова филтрация [7], при която функцията на загубата е модифицирана:

(3) $$J(\hat{x}_k) = \sum_{i=1}^{k} \lambda^{k-i}(y_i - H\hat{x}_{i|i-1})^2 \ ,$$

тук $\lambda \in (0,1]$ е коефициент на „забравяне“, който придава по-голяма тежест на по-новите измервания.

Тези модификации подготвят основата за въвеждане на отказочувствителни механизми, чрез които филтърът не само оценява състоянието, но и открива аномалии в работата на каналите. Такива механизми включват използването на индикатори за надеждност на измерванията, адаптивно пренастройване на Калмановото усилване и теглата при многоканално агрегиране, както и моделиране на отказите чрез вероятностни променливи. Комбинацията от тези подходи позволява на диагностичния блок да идентифицира и локализира откази, докато алгоритъмът динамично коригира своето поведение. По този начин системата запазва стабилността и точността на оценяването дори при наличие на шум, загуба на пакети или функционален отказ на радиоканалите.

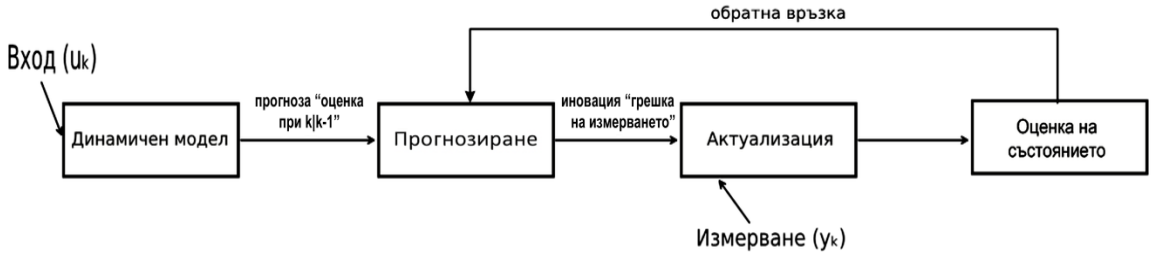
Концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация

Класическата Калманова филтрация осигурява надеждно оценяване при нормални условия, но остава уязвима при наличие на откази и аномалии. Включването на диагностични механизми и адаптивни стратегии открива възможност за изграждане на по-устойчива методологична рамка. На тази основа е предложен концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация, който интегрира оценяването и диагностиката в единен процес, пригоден за работа в условия на ненадеждни радиоканали при управление на БЛА.

Структурната организация на модела в най-общ вид запазва последователността на етапите: *прогнозиране – актуализация – оценка на състоянието*, като паралелно с тях работи **диагностичен блок**. Този блок следи за наличие на аномалии в радиоканалите и в случай на установен отказ предизвиква адаптивна промяна на коефициентите на филтъра. По този начин се осигурява непрекъснатост на оценяването и устойчивост на алгоритъма при наличие на шум, загуби или пълни откази в каналите за радиоуправление.

Основата на модела следва логиката на класическата Калманова филтрация, където се разграничават следните етапи:

- *Прогнозиране* – извършва се прогноза на състоянието на базата на динамичния модел на БЛА и наличните входни сигнали;
- *Актуализация* – прогнозата се коригира чрез наличните измервания, като се използва Калмановото усилване;
- *Оценка на състоянието* – получава се оптимална оценка на текущото състояние.

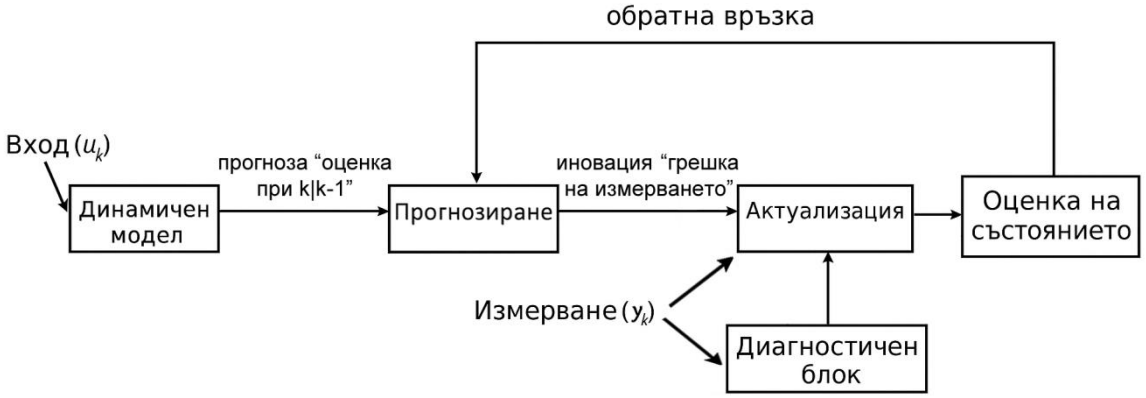


Фиг. 1. Класическа Калманова филтрация

Новото в концептуалния модел е, че към тези класически етапи е добавен **диагностичен блок**, който функционира паралелно и взаимодейства с останалите компоненти. По този начин се формира интегрирана рамка за едновременно оценяване и диагностика.

Диагностичният блок е ключов елемент, който отличава отказочувствителната Калманова филтрация от класическата. Неговата функция е да следи за:

- *аномалии в измерванията* – рязко отклонение на иновацията (разликата между реалното измерване и предсказаното измерване от модела);
- *увеличаване на шумовата ковариация* – признак за деградация на канала;
- *липса на данни (packet loss)* – моделируемо чрез бинарни индикатори $\gamma_i(k)$.



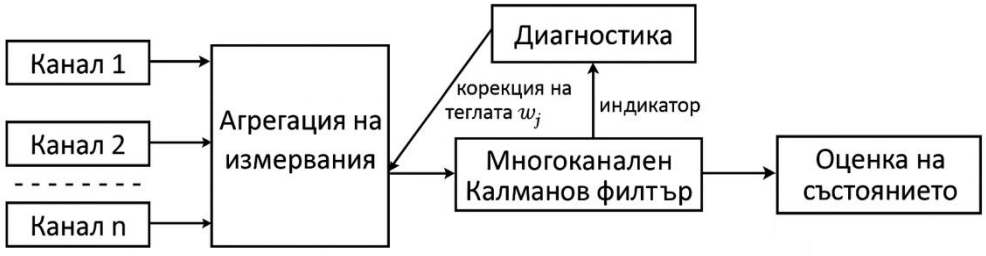
Фиг. 2. Отказочувствителна Калманова филтрация

При наличие на съмнение за отказ, диагностичният блок може да предизвика:

- адаптивно пренастройване на Калмановото усилване K_k (Kalman gain) – ключовият коефициент, който определя каква тежест се дава на измерванията спрямо прогнозата;
- промяна на ковариациите R и Q на процесния шум и на измервателния шум, които могат да се адаптират според диагностицираните откази;
- корекция на теглата w_j в многоканален сценарий – при агрегиране на измервания от няколко радиоканала, теглата на всеки канал се адаптират (намаляват/нулират) при наличие на отказ.

Така диагностичният блок не е пасивен наблюдател, а активен регулатор, който осигурява устойчивост на алгоритъма.

В реални условия радиоуправлението на БЛА често разполага с множество комуникационни канали или сензори. Концептуалният модел обединява техните измервания чрез **агрегационен блок**, където всеки канал има тегло w_j . При нормална работа теглата са приблизително равномерни, но при установен отказ теглото на съответния канал се редуцира или занулява. На фиг. 3 е представена структурата на многоканална филтрация с възможност за *изключване/понижаване на тежестта* на отказал канал.



Фиг. 3. Структура на многоканална филтрация с адаптивно управление на теглата

Тази адаптивна схема позволява да се намали влиянието на дефектен канал върху общата оценка и се увеличи ролята на надеждните канали, като се постигне устойчива оценка дори при частична загуба на комуникация.
Комбинацията от агрегация и диагностика превръща многоканалния вариант в особено подходящ за реални приложения, където отказите не са изключение, а очаквано събитие.

Посредством схемите за описание на концептуалния модел се визуализира преминаването от базов модел към усъвършенствана архитектура, която интегрира диагностика, адаптация и устойчиво оценяване.

Приложимост на модела

Предложеният концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация има потенциал за широко приложение в различни области, където надеждността на данните и устойчивостта на алгоритмите са критично важни. При безпилотните летателни апарати надеждността на радиоканалите е пряко свързана с безопасността и устойчивостта на управлението [8]. Предложеният модел позволява своевременно откриване и компенсиране на загуби на пакети, смущения или пълни откази на каналите. Това гарантира запазване на управляемостта и стабилността на полета дори в условия на влошена комуникационна среда.

Концептуалният модел е приложим и в системи, които използват множество сензори за измерване на едни и същи или свързани параметри [9]. Чрез механизма на теглата w_j е възможно динамично адаптиране към качеството на данните от всеки сензор. Това позволява надеждно оценяване дори при повреда на отделни датчици и повишава устойчивостта на цялата система. В комуникационни системи с излишък от канали или пътища за пренос, отказочувствителната Калманова филтрация може да служи като механизъм за интелигентна селекция и приоритизация. При наличие на канали с повишено ниво на шум или такива, които са компрометирани, алгоритъмът редуцира тяхното влияние, като запазва високото качество на агрегирания сигнал. Това е особено важно в приложения като телекомуникации, навигация и мрежи за наблюдение.

Освен в горепосочените области, моделът може да бъде комбиниран с адаптивни и нелинейни филтри, което да позволи работа и при по-сложни динамики. Така отказочувствителният подход се превръща в универсален инструмент за оценяване в условия на несигурност и частични откази.

Ограничения на модела

Въпреки предимствата си, предложеният концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация притежава някои съществени ограничения [10]:

- *Зависимост от статистическите модели на отказите* – ефективността на диагностичния механизъм и адаптивната актуализация е силно обвързана с точността на априорно зададените вероятностни модели на отказите. При несъответствие между теоретичните модели и реалните проявления на аномалиите съществува риск от влошаване на качеството на оценката;
- *Необходимост от оптимизация за работа в реално време* – въвеждането на диагностични блокове, адаптивни коефициенти и многоканална обработка повишава изчислителната сложност спрямо класическата Калманова филтрация. Това поставя предизвикателства при интеграция в бордови системи на БЛА, където ресурсите са ограничени и се изисква надеждна работа в реално време.

Тези ограничения определят направления за бъдещи изследвания, свързани с *усъвършенстване* на механизмите за автоматично обучение на статистическите модели на откази и *разработка* на оптимизирани алгоритми за бърза и ефективна реализация.

Заключение

Предложеният концептуален модел на отказочувствителна Калманова филтрация интегрира процесите на диагностика и оценяване в единна методологична рамка. Чрез въвеждане на вероятностни модели на откази (напр. променливи за загуба на измервания, увеличена ковариация на шумовете или системен дрейф) и прилагане на адаптивна актуализация на Калмановото усилване, ковариациите и теглата при многоканално агрегиране, моделът осигурява повишена устойчивост на оценките при наличие на аномалии в радиоканалите. По-нататъшните изследвания може да бъдат насочени към разработване на симулационна среда за оценка при различни сценарии на откази, комбиниране с адаптивни и нелинейни филтри, и експериментално валидиране в реални условия с безпилотни летателни апарати.

Разгледаната приложимост показва, че подходът е подходящ не само за радиоуправление на БЛА, но и за мултисензорни системи и многоканални комуникационни среди. Предимството на модела е неговата гъвкавост, която позволява интеграция с различни архитектури и разширяване към по-сложни динамични сценарии. По този начин се поставя основата за практическа реализация на отказочувствителна Калманова филтрация, способна да повиши надеждността и безопасността на критични системи за управление.

Литература:

1. Kalman, R. E., “A new approach to linear filtering and prediction problems”, *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960
2. Maybeck, P. S., *Stochastic Models, Estimation, and Control*., Academic Press, 1979
3. Chen W., and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*., Kluwer Academic Publishers, 1999
4. Li, X. R., and V. P. Jilkov, “Survey of maneuvering target tracking. Part I: Dynamic models”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 1333–1364, 2003
5. Simon, D., *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*., Wiley-Interscience, 2006.
6. Андонов, А., *Радиокомуникационни системи със специално предназначение*., С.: ВТУ "Т.Каблешков", 2009, 300 с.; ISBN 078-954-12-0167-1
7. Mustaev, A., et al., “A switching Kalman filter approach to online mitigation and correction of sensor corruption for inertial navigation”, *arXiv preprint*, 2024
8. “Cooperative Positioning Method of a Multi-UAV Based on an Adaptive Fault-Tolerant Federated Filter”, *Sensors*, 2023
9. Kheirandish, A., A. Mohammadi, et al., “Fault-Tolerant Sensor Fusion in Mobile Robots Using Multiple Model Kalman Filters,” *Robotics and Autonomous Systems*, 2023
10. Kinatas, H., and C. Hajiyev, “Adaptive Fault-Tolerant Multiplicative Attitude Filtering for Small Satellites”, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 39, no. 1, pp. 152–162, 2025, https://doi.org/10.1002/acs.3927

СИНТЕЗ НА КАНАЛНО-СЪГЛАСУВАНИ СИГНАЛИ ЗА РАДИОУПРАВЛЕНИЕ НА БЛА

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: *БЛА (Безпилотен летателен апарат), радиоуправление, синтез на сигнали, канали за управление, отказоустойчива филтрация, надеждност, адаптивни алгоритми*

Резюме: *Надеждността на радиоканалите за управление е критичен фактор за сигурността и ефективността на безпилотните летателни апарати (БЛА). В условията на шумове, загуби на пакети и откази на канали, класическите методи за генериране на управляващи сигнали често водят до влошено качество на управление и риск от прекъсване на мисията. В статията е предложен подход за синтез на сигнали, съгласувани с характеристиките на радиоканалите, който интегрира модели на канали с вероятностни откази и адаптивни механизми за оптимизация. Методът използва динамично адаптиране на управляващите сигнали към текущото състояние на комуникационната среда, като по този начин се повишава устойчивостта и точността на управлението.*

SYNTHESIS OF CHANNEL-MATCHED SIGNALS FOR UAV RADIO CONTROL

Filip Iliev, Georgi Sotirov

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

Keywords: *UAV (Unmanned Aerial Vehicle), radio control, signal synthesis, control channels, fault-tolerant filtering, reliability, adaptive algorithms*

Abstract: *The reliability of radio control channels is a critical factor for the safety and efficiency of unmanned aerial vehicles (UAVs). Under conditions of noise, packet loss, and channel failures, classical methods for generating control signals often lead to degraded performance and potential mission interruption. This paper proposes an approach for channel-matched synthesis of control signals, which integrates probabilistic channel fault models with adaptive optimization mechanisms. The method uses dynamic adjustment of control signals according to the current state of the communication environment, thereby enhancing the robustness and accuracy of UAV control.*

Въведение

Надеждността на радиоканалите за управление е ключов фактор за ефективността и безопасността при експлоатацията на безпилотни летателни апарати (БЛА). Радиоканалите, използвани за предаване на управляващи команди и телеметрични данни, са подложени на смущения – шумове, загуба на пакети, многолъчево разпространение и закъснения, които могат да доведат до влошаване на управлението или до отказ на комуникационната връзка [8, 9]. Класическите методи за генериране на управляващи сигнали, основани на фиксирани параметри, често не осигуряват достатъчна надеждност при такива условия [9].

Съвременните подходи за управление на БЛА изискват адаптивност към динамичната комуникационна среда [5, 10]. В този контекст възниква необходимост от методи за синтез на управляващи сигнали, съгласувани с характеристиките на радиоканалите, така че да се гарантира устойчива и непрекъсната комуникация [8, 10].

В съответствие с изследванията в областта на отказочувствителната филтрация [1, 7], настоящата работа предлага подход за *канално-съгласуван синтез на управляващи сигнали*,

който обединява моделиране на радиоканали с вероятностни откази и адаптивна оптимизация на управляващите въздействия, целящи повишаване на устойчивостта и точността на управлението на БЛА в реални условия.

1. Теоретични основи и постановка на задачата

Ефективният синтез на управляващи сигнали за безпилотни летателни апарати (БЛА) изисква адекватно моделиране на радиоканалите, чрез които се осъществява обменът на команди и данни. Радиоканалът представлява стохастична среда, в която сигналът се подлага на затихване, фазови и амплитудни изкривявания, шум и възможни временни прекъсвания [8, 9]. Тези фактори водят до изменчивост на параметрите на комуникационния тракт, което налага включването им в общия модел на системата за управление [5].

1.1. Математически модел на радиоканала

Да разгледаме система за радиоуправление на БЛА, в която командният сигнал $u(k)$ се предава през комуникационен канал и се приема в бордовия контролер под формата на сигнал $y(k)$. Поведението на радиоканала може да се опише чрез линейно стохастично уравнение от вида:

(1) $$y(k)=\alpha(k)u(k-\tau_k)+\nu(k)\ ,$$

където: $\alpha(k)$ е коефициентът на предаване (амплитудна характеристика) на канала, който може да варира във времето поради затихване или смущения; τ_k е променливото времево закъснение, отразяващо динамичните промени в средата на разпространение; $\nu(k)$ е адитивен шум, моделируем като гаусов процес с нулево средно значение и дисперсия $R_\nu(k)$.
Подобен тип стохастични модели са широко използвани при описанието на комуникационни канали и системи за управление [1, 2, 8].

При наличие на откази или временна загуба на пакети, коефициентът $\alpha(k)$ може да приема стойност 0 (липса на сигнал), което се моделира чрез бинарна променлива $\delta(k)\in\{0,1\}$, определяща състоянието на канала:

(2) $$y(k)=\delta(k)\alpha(k)u(k-\tau_k)+\nu(k)\ ,$$

като вероятността за изправно състояние на канала е $P\left[\delta(k)=1\right]=p_c$, а за отказ $P\left[\delta(k)=0\right]=1-p_c$. Такъв вероятностен подход за моделиране на откази е типичен в отказочувствителните архитектури [3, 4, 7].

В многоканален сценарий, характерен за БЛА с резервирани радиолинии или комбинирани комуникационни модули, моделът се обобщава до векторна форма:

(3) $$\mathbf{y}(k)=\mathbf{D}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{u}(k-\boldsymbol{\tau}_k)+\mathbf{v}(k)\ ,$$

където $\mathbf{D}(k)=diag\left[\delta_1(k),\delta_2(k),...,\delta_M(k)\right]$ е диагонална матрица на изправностите на каналите, а $\mathbf{H}(k)$ е матрица на коефициентите на предаване.
Подобни многомоделни и векторни представяния са подробно разгледани в [5, 10] и служат като основа за адаптивно управление при вероятностни откази.

1.2. Модел на системата за управление

Нека динамиката на БЛА се опише чрез стандартен дискретен модел на състоянието:

(4) $$\begin{aligned}\mathbf{x}(k+1)&=\mathbf{\Phi}(k)\mathbf{x}(k)+\mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k)+\mathbf{w}(k)\\ \mathbf{z}(k)&=\mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k)+\mathbf{n}(k)\end{aligned}\ ,$$

където: $\mathbf{x}(k)$ е векторът на състоянието; $\mathbf{u}(k)$ е управляващият сигнал, генериран от наземната станция; $\mathbf{z}(k)$ – измерванията на борда; $\mathbf{w}(k)$ и $\mathbf{n}(k)$ – шумове на процеса и измерването, моделирани като независими гаусови процеси.
Такъв вид формулировка е характерна за класическата Калманова филтрация [1–3], която осигурява оптимално оценяване при стохастични смущения.

Тъй като реалният управляващ сигнал, достигнал до борда, е изкривен от радиоканала, ефективното управление трябва да се основава на сигнал $\mathbf{u}(k)$, който отчита текущото състояние на канала:

(5) $$\mathbf{u}(k) = \mathbf{F}[\mathbf{u}(k), \mathbf{D}(k), \mathbf{H}(k), \mathbf{R}_v(k)] \ ,$$

където функцията $\mathbf{F}(\cdot)$ описва алгоритъма на *канално-съгласувания синтез*.

Интегрирането на такава функция в управлението е характерно за съвременните адаптивни методи [6, 8].

1.3. Формулировка на задачата за синтез

Задачата за синтез на канално-съгласувани сигнали се състои в определяне на оптимален управляващ вектор $\mathbf{u}^*(k)$, който минимизира функционал (критерий за оптимизация) от вида:

(6) $$J = E\left\{\sum_{k=0}^{N} \| \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_r(k) \|_Q^2 + \| \mathbf{u}(k) \|_R^2 \right\} \ ,$$

при наличие на случайни вариации в параметрите на канала $\mathbf{D}(k)$, $\mathbf{H}(k)$ и шумовете $\mathbf{v}(k)$.
Този тип квадратични функционали произлизат от теорията на оптималното управление и Калмановата филтрация [1–3].

Оптималният закон за управление следва да осигурява минимално средноквадратично отклонение на траекторията на БЛА от референтната, при запазване на устойчивост и компенсиране на ефектите от откази и деградации в каналите [4, 6].
В този контекст синтезът може да бъде разглеждан като двустепенен процес, включващ:

- *Диагностика и оценка на състоянието на каналите*, реализирана чрез отказочувствителна или многоканална филтрация;
- *Адаптивна корекция на управляващите сигнали* в зависимост от получените вероятностни оценки на надеждността на каналите.

Реализацията на този процес позволява не само компенсиране на загуби на пакети и шумове, но и осигурява предсказуемо и устойчиво управление, съгласувано с динамично изменящите се комуникационни условия.

2. Метод за синтез на канално-съгласувани сигнали

Предложеният на фиг. 1 метод комбинира диагностична оценка на радиоканалите с адаптивна оптимизация на управляващите команди и включва *три основни етапа*: оценка на каналите, формиране на комбиниран сигнал и локална оптимизация.

Етап 1 – оценка на състоянието на каналите

В този етап се извършва диагностика на комуникационната среда чрез оценка на текущите коефициенти на предаване $\mathbf{H}(k)$, вероятностна оценка на изправността на каналите $P[\delta_i(k) = 1]$ и изчисляване на дисперсията на шумовете $\hat{R}_{v,i}(k)$.

За целта се използва модифициран Калманов филтър с отказочувствителна корекция, който позволява едновременно оценяване на динамичните параметри на канала и вероятностите за отказ [1, 4, 6]. Получените оценки служат като вход за следващия етап.

Етап 2 – тегловна комбинация на управляващите сигнали

Поради възможното наличие на множество паралелни радиоканали, всеки с различна надеждност и шумови характеристики, управляващият сигнал се формира като претеглена комбинация:

(7) $$\tilde{u}(k) = \sum_{i=1}^{M} w_i(k) u_i(k) \ ,$$

където теглата $w_i(k)$ се определят на базата на вероятностната оценка на изправността и качеството на канала:

(8) $$w_i(k) = \frac{P[\delta_i(k) = 1]}{\sum_{j=1}^{M} P[\delta_j(k) = 1]} \cdot f(\hat{R}_{v,i}(k)) \ .$$

Този принцип на тегловно комбиниране е свързан с мултимоделните и адаптивни методи за обработка на сигнали [5, 10], при които различни канали или модели допринасят пропорционално на тяхната надеждност.

Функцията $f(\cdot)$, отчитаща влиянието на шума и затихването, е базирана на принципите за адаптивно разпределение на тегловите коефициенти в отказоустойчиви архитектури [9], като каналите с по-висока надеждност и по-ниска шумова компонента получават по-голяма тежест в синтеза на управляващия сигнал.

Етап 3 – оптимизация

Финалният синтезиран сигнал $\tilde{u}(k)$ се оптимизира спрямо критерий за минимизация на отклонението от референтната траектория и разхода на управляваща енергия:

(9) $$u^*(k) = \arg\min_{u(k)} E\left\{ \| x(k) - x_r(k) \|_Q^2 + \| \tilde{u}(k) \|_R^2 \right\} \ .$$

Оптимизацията се извършва в реално време чрез адаптивен итеративен алгоритъм, който използва текущите оценки на каналите [6, 10]. Това позволява динамична корекция на управляващите въздействия при промени в комуникационната среда.

Фиг. 1. Алгоритмична последователност на метода за синтез на канално-съгласувани сигнали

3. Приложение към многоканални системи за радиоуправление на БЛА

Многоканалните системи за радиоуправление на БЛА повишават надеждността чрез използване на няколко паралелни радиолинии, работещи на различни честоти или протоколи, което компенсира локални откази и шумове [5, 7, 8]. Това осигурява по-голяма устойчивост срещу загуби на пакети и интерференция [9, 10].

3.1. Моделиране на многоканална архитектура

Нека системата разполага с M независими канала за предаване на управляващи сигнали, като всеки канал i се описва чрез коефициент на предаване $\alpha_i(k)$, вероятност за отказ $P[\delta_i(k) = 0]$ и шумова дисперсия $R_{v,i}(k)$.

Моделът на многоканалното управление е:

(10) $$\mathbf{y}(k) = \mathbf{D}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{u}(k - \boldsymbol{\tau}_k) + \mathbf{v}(k) \ ,$$

където векторът $\mathbf{u}(k)$ съдържа управляващите команди, изпратени паралелно по отделните канали. Моделът съответства на мултимоделните подходи за управление на системи с променлива надеждност [5, 9], както и с методите за оценка на състоянието на комуникационни канали при БЛА [8].

3.2. Механизъм за избор и комбиниране на канали

В рамките на многоканалната архитектура, предложеният метод реализира адаптивен механизъм за управление на комуникационните ресурси, който включва динамичен избор на активни канали според текущата им надеждност. Каналите с висока вероятност за отказ се изключват от процеса на синтез, като управляващите сигнали се разпределят чрез тегловна комбинация, отчитаща оценената шумова устойчивост и функционална достъпност на всеки канал [7, 9, 10].

По този начин се минимизира рискът от едновременен отказ и се осигурява устойчивост на управлението в условия на комуникационна несигурност [8].

Формираният комбиниран сигнал е:

(11) $$\tilde{u}(k) = \sum_{i=1}^{M} w_i(k) u_i(k), \quad \sum_{i=1}^{M} w_i(k) = 1 \ ,$$

като теглата $w_i(k)$ се актуализират в реално време според оценките на състоянието на каналите [10].

3.3. Сценарии за приложение

Предложеният многоканален подход позволява реализация на различни стратегии за управление на комуникационните ресурси, съобразени с конкретните условия на експлоатация и надеждност на каналите [7–9].

Сред основните сценарии се открояват:

- *Резервирани канали (hot-standby)* – системата поддържа няколко канала, при което по основния се предават управляващите команди, а резервните остават в режим на готовност. При засичане на отказ или влошаване на основния канал, трафикът автоматично се прехвърля към най-надеждния резервен канал, без прекъсване на управлението [9].
- *Паралелно комбиниране (load sharing)* – управляващите команди се разпределят едновременно между няколко активни канала. Тегловните коефициенти се определят според моментната им надеждност и качество на връзката, което минимизира вероятността от загуба на данни и подобрява устойчивостта на управлението [10].
- *Адаптивен избор на канал* – системата извършва непрекъсната оценка на състоянието на комуникационните канали и динамично насочва управляващите сигнали към най-надеждния от тях [8, 9]. Това позволява бърза реакция при влошаване на параметрите на даден канал и осигурява оптимално използване на наличните ресурси.

Предимствата на разгледаните *сценарии за реализация на многоканален подход* се изразяват в повишена устойчивост спрямо шумови и интерференционни въздействия, намалена вероятност за загуба на критични управляващи команди, възможност за енергийна оптимизация чрез изключване на неефективни канали, както и подобрена безопасност на БЛА при работа в сложни среди – градска инфраструктура и други приложения в условия на несигурност [7, 10].

4. Симулационна оценка на ефективността на канално-съгласувания синтез

Ефективността на предложения подход е оценена чрез симулации в среда MATLAB/Simulink, използвайки дискретен модел на безпилотен летателен апарат с многоканална система за радиоуправление [9, 10]. Симулационният сценарий предвижда паралелно предаване на управляващите команди по три независими радиоканала ($M = 3$), всеки характеризиращ се със собствена вероятност за отказ и индивидуална шумова дисперсия

[8]. Това позволява реалистично моделиране на функционален отказ на радиоканалите и оценка на устойчивостта на управлението в условия на несигурна среда [6, 10].

Условия на симулацията

- *Динамичен модел на БЛА* – линеаризиран около установен режим на полет, описан чрез стандартен Калманов модел [1, 2, 4].
- *Радиоканали:*
  - Канал 1 – надежден, но със средна дисперсия на шума;
  - Канал 2 – високочестотен канал със силни смущения;
  - Канал 3 – резервен канал с периодични откази (вероятност за отказ 15%).
- *Шум* – адитивен гаусов процес със средно нула и изменяща се дисперсия.
- *Закъснение* – случайно закъснение τ_k в границите от 1 до 3 дискретни стъпки.

Симулационната среда в тази конфигурация позволява изследване на поведението на системата за управление при различни сценарии на комуникационна несигурност, отразяващи реални условия на радиоуправление [8, 9]. Проведени са сравнителни експерименти между два подхода за синтез на управляващи сигнали – класическия, който използва фиксирани команди без отчитане на състоянието на каналите, и предложения канално-съгласуван метод с тегловна комбинация и адаптивна оптимизация [6, 10].

Основните резултати от сравнителните симулации ясно очертават предимствата на канално-съгласувания синтез спрямо класическия подход. При използване на фиксирани команди, загубата на пакети в канал 3 води до съществени отклонения от референтната траектория, особено при наличие на шум и закъснения [4, 9]. За разлика от това, предложената методика демонстрира 30–40% намаление на средноквадратичната грешка, повишена устойчивост при отказ на един или повече канали, както и по-гладка динамика на управляващите сигнали без резки преходи при смяна на канала [6, 10]. Допълнително, адаптивният механизъм за тегловна комбинация ефективно изключва ненадеждните канали и преразпределя управляващите команди към останалите, като същевременно с това оптимизира енергийния разход [8–10].

Заключение

Представеният метод за *синтез на канално-съгласувани сигнали* осигурява динамична адаптация на управлението към текущото състояние на комуникационната среда и ефективно комбиниране на канали с различна надеждност и шумови нива.

Резултатите от симулациите потвърждават съществено повишаване на точността и устойчивостта на управлението в условия на шум, закъснения и вероятностни откази. Предложената методика превъзхожда класическите подходи по отношение на стабилност и енергийна ефективност и може да се прилага както при едноканални, така и многоканални архитектури.

Бъдещите изследвания следва да бъдат насочени към експериментална верификация с реални безпилотни платформи и усъвършенстване на алгоритъма за работа в среди с висока интерференция и ограничени ресурси.

Литература:

1. Kalman, R. E., “A new approach to linear filtering and prediction problems”, *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960
2. Simon, D., *Optimal State Estimation: Kalman, H∞, and Nonlinear Approaches*., Wiley-Interscience, 2006
3. Maybeck, P. S., *Stochastic Models, Estimation, and Control*., Academic Press, 1979
4. Chen, W., and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*., Kluwer Academic Publishers, 1999
5. Li, X. R., and V. P. Jilkov, “Survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model methods”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321, 2005
6. Kinatas, H., and C. Hajiyev, “Adaptive Fault-Tolerant Multiplicative Attitude Filtering for Small Satellites”, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 39, no. 1, pp. 152–162, 2025, https://doi.org/10.1002/acs.3927
7. Zhang, Y., and J. Jiang, “Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems”, *Annual Reviews in Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, 2008
8. Wu, Y., and W. Luo, “Channel estimation and adaptive filtering techniques for UAV communication networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1158–1185, 2022
9. Chen, C., X. Wang, and H. Li, “Fault-tolerant control design for UAVs under stochastic communication channels,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 31, no. 4, pp. 1482–1495, 2023
10. Hassan, M., and S. Khan, “Adaptive multi-channel signal synthesis for UAVs in fading environments”, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 38, no. 7, pp. 1420–1438, 2024.

СЛЕДСПЪТНИКОВ АВИАЦИОНЕН МОНИТОРИНГ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

Павел Пенев

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

Ключови думи: *Аерокосмически мониторинг, спътникови системи за наблюдение, следспътников авиационен мониторинг с безпилотни летателни апарати (БЛА) и техните задачи*

Резюме: *Предложена е дефиниция на аерокосмически мониторинг. Обоснована е необходимостта от следспътников мониторинг с БЛА на основание анализ на техните силни и слаби страни спрямо спътниците за наблюдение. Посочени са основните компоненти на структурния и операционния модел на БЛА и се формулира подход за определяне на районите им на търсене. Дефинирани са целевите задачи при следспътников авиационен мониторинг с използване на БЛА.*

POST-SATELLITE AVIATION MONITORING USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Pavel Penev

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

Keywords: *Aerospace monitoring, satellite surveillance systems, post-satellite aviation monitoring with unmanned aerial vehicles (UAVs) and their tasks*

Abstract: *A definition of aerospace monitoring is proposed. The need for post-satellite monitoring with UAVs is justified based on an analysis of their strengths and weaknesses compared to observation satellites. The main components of the structural and operational model of UAVs are indicated and an approach for determining their search areas is formulated. The target tasks for post-satellite aviation monitoring using UAVs are defined.*

Аерокосмическите системи и технологии понастоящем имат определящо значение за нормалното функциониране на икономиката, екологията, хуманитарната област и отбраната. На настоящия етап аерокосмическата информация, получавана основно от спътници за дистанционни изследвания (ДИ) и безпилотни летателни апарати (БЛА) за наблюдение има основен дял във формирането на съвременната информационна среда.

Мониторингът (т. е. наблюдението и контрола) на обекти, явления и процеси на земната повърхност е една от основните функции на спътниците за ДИ и на пилотируемите летателни апарати (ЛА) и БЛА за наблюдение [6]. В първия случай мониторингът се нарича космически, а във втория – авиационен (аеромониторинг).

Аерокосмическият мониторинг представлява синхронизирано оперативно наблюдение и контрол с космически и авиационни системи и средства за ДИ на състоянието на обекти, явления и процеси на земната (морската) повърхност (при необходимост и с наземни измервателни комплекси), с оглед последващо осъществяване на превантивни действия. Аерокосмическият мониторинг е основа на изработването на управленски решения в различни области от живота на обществото.

Космическият мониторинг, осигуряващ получаването на изображения от космическите системи и средства за наблюдение на различни обекти/райони на земната (морската) повърхност е пряко свързан с редица основни понятия на теорията на ДИ на Земята – полезрение, полоса (ивица) на заснемане, полоса (ивица) на обзора, пространствена

разделителна способност, информативност и периодичностт на наблюдение от съответния спътник [7]. При това показател за детайлността на полученото изображение е пространствената разделителна способност, представляваща способността на дадена система за наблюдение да разграничи единичен обект от земната (морската) повърхност (в m), а информативността е информация, получавана от средството за наблюдение, която изяснява в необходимата степен характеристиките на наблюдавания обект.

Известно е, че съвременните спътници за ДИ се намират на ниски околоземни орбити и нямат възможности, за разлика от авиационните системи и средства за наблюдение, да осъществяват продължително време наблюдение и контрол на обекти, явления и процеси (съответните спътници „изгряват“ и „залязват“). С оглед увеличаване на това време до приемливи стойности, осигуряващо получаване на необходимите за анализ и оценка едромащабни изображения на обекти/райони, за следспътников мониторинг в редица държави се използват пилотируеми ЛА (самолети и вертолети) и БЛА за наблюдение. Следспътниковият авиационен мониторинг в реален мащаб на времето (РМВ) през последните десетилетия е неразделна част на аерокосмическия мониторинг и има за цел получаване на по-детайлни изображения на обекти/райони от тези на космическия мониторинг.

Основните силни и слаби страни на спътниците за ДИ, реализиращи космически мониторинг с оптикоелектронни и радиолокационни системи и средства и летящи на слънчево-синхронни орбити (ССО), спрямо БЛА за наблюдение, са показани в табл. 1.

Таблица 1

№	Силни страни на спътниците за наблюдение спрямо БЛА за наблюдение	Слаби страни на спътниците за наблюдение спрямо БЛА за наблюдение
1	Голям пространствен обхват на наблюдаваната територия, значителен обем на получавана информация и независимост от релефа;	Бордовите сензори на спътниците за наблюдение, както и самите спътници са многократно по-скъпи и сложни от БЛА за наблюдение и техните сензори;
2	Наблюдение на обекти/ райони за мониторинг с висока и свръхвисока пространствена разделителна способност, в РМВ; при автономна работа на целевата апаратура;	По-ниска пространствена разделителна способност и по-ниска оперативност на предаване на изображенията спрямо тези на БЛА за наблюдение, летящи на малки и пределно-малки височини;
3	Движение на спътниците за наблюдение основно на ССО, осигуряващи непроменена осветеност от обиколка към обиколка на едни и същи точки от трасето на полета;	Предимствата на спътниците за наблюдение, движещи се по ССО, се реализират дискретно, като в зависимист от параметрите на орбитата често през 1–2 денонощия (за разлика от БЛА);
4	Висока денонощна производителност (заснета площ за денонощие) на спътниците за наблюдение и ретроспективност (наличие на собствена база от изображения, получени значително преди текущия космически мониторинг);	Високата денонощната производителност на спътниците за наблюдение се конкурира с ефективността на реалната производителност на БЛА, определяща се от голямата продължителност на полета им над района/обекта за мониторинг;
5	Реализиране на космически мониторинг при относително малко време на пребиваване на спътника в зоната на видимост на съответните обекти или райони.	По-малко време на пребиваване на спътника в зоната на видимост на обекта за мониторинг от това на БЛА за наблюдение.

По отношение втората силна страна на спътниците в табл. 1 следва да се отбележи, че изображенията със свръхвисока пространствена разделителна способност [7] са значително по-скъпи (дори десетократно) от тези с висока пространствена разделителна способност.

Към разгледаните в табл. 1 силни и слаби страни на спътниците за наблюдение спрямо БЛА за наблюдение могат да се добавят силно развития международен пазар на космически изображения; получаване на радиолокационни изображения независимо от условията на времето и денонощието; космически мониторинг на райони и обекти в различни диапазони на електромагнитния спектър, повишаващи информативността на изображенията [4], формиране на геопространствена информация, включително на цифрови модели на местността и др.

Съвременните БЛА за наблюдение по ефективност, ефикасност, уязвимост, безопасност и по оперативност на получаваната информация в РМВ превъзхождат пилотируемите ЛА. Поради това понастоящем особено актуални и ефективни за следспътников мониторинг са съвременните БЛА за наблюдение [3], функциониращи в състава на безпилотни

авиационни системи (БАС). Всяка от тях е целева система, включваща няколко БЛА, наземна станция за контрол и управление (НСКУ) и средства за наземно осигуряване.

При изпълнение на следспътников авиационен мониторинг с използване на БЛА следва да се изхожда от техните основни силни и слаби страни спрямо спътниците за ДИ, реализиращи космически мониторинг, които са показани в табл. 2.

Таблица 2

№	Силни страни на БЛА за наблюдение спрямо спътниците за наблюдение	Слаби страни на БЛА за наблюдение спрямо спътниците за наблюдение
1	Значително по-ниска обща и експлотационна стойност на БЛА и на сензорите им спрямо спътниците за наблюдение;	По.малки пространствени граници на зоните за наблюдение на БЛА спрямо тези на спътниците за наблюдение;
2	По-ниска финансова стойност на получаваните изображения на обектите или районите за мониторинг от тази със спътници за наблюдение;	По-ниски възможности на БЛА за предаване на големи обеми от видеоинформация към НСКУ спрямо тази на спътниците за наблюдение;
3	По-висока пространствена разделителна способност на изображенията (от порядъка на cm) от тази на спътниците за наблюдение при полети на БЛА на пределно-малки височини и на малка скорост, както и възможност за полети под облаци;	Необходимост от успешно изпълнение на рисков „бръснещ“ полет на БЛА за наблюдение над обекта/района за авиационен мониторинг, изискващ висока квалификация на екипа на НСКУ;
4	Наблюдение от БЛА на обекти/райони за авиационен мониторинг с по-ниска стойност на разделителната способност по време (интервал между снимките на даден обект) от тази със спътници за наблюдение	Необходимост от използване на БЛА за наблюдение с голяма продължителност на полета със съответните сензори (или няколко БЛА), с цел намаляване на интервала между снимките;
5	Висока оперативност на информацията, предавана към НСКУ в РМВ; както и високи възможности за откриване и следене на подвижни обекти	Необходимост от непрекъсната ретранлация на сигналите от БЛА за наблюдение с цел предаването им към НСКУ
6	Висока информативност на изображенията и възможност за създаване на високоточни 3D модели при различни ъгли на оглеждане на обекта (обектите) от БЛА;	Необходимост от разходи за ГИС-системи и за екип от съответни специалисти за дешифриране на изображенията и създаване на моделите,
7	Гъвкавост, многоцелевост и висока мобилност.	Необходимост от екип и средства за бърза смяна (при необходимост) на сензорите на целевото оборудване на БЛА и за предислоциране на БАС от един район/обекти за мониторинг към друг.

От съдържанието на табл. 2 следва, че **използването на БЛА за мониторинг на обекти е с по-висока икономическа ефективност от тази на спътниците за наблюдение, при една и съща стойност на разходите.**

Разгледаните в табл. 2 силни и слаби страни на БЛА за наблюдение спрямо спътниците за наблюдение имат съществено значение за реализирането на следспътников авиационен мониторинг, като не са единствените. Към положителните страни могат да се добавят възможностите на тези БЛА да компенсират ограниченията на спътниците с електронно-оптически средства за наблюдение поради плътна облачност, запрашеност и задименост на обекта/района за мониторинг (чрез изпълнение на полети на пределно-малки височинии); възможност за спрягане на БЛА с други авиационни и космически системи и др. От военна гледна точка съществени предимства са отсъствието на човешки загуби на борда на БЛА в условия на военни кризи и конфликти, както и ниската им откриваемост (оптична, звукова, инфрачервена, радиолокационна).

Конкретните възможности по пространствена разделителна способност на спътниците за наблюдение и на БЛА за наблюдение, както и различното време и височини на пребиваване на спътниците и БЛА в зоната на видимост на обектите за мониторинг позволяват получените космическите изображения, да се съпоставят, анализират и комплексно да се изучат техните характеристики. Комбинирането на използването на спътници и БЛА за наблюдение на обекти/райони позволяват изключването (минимизирането) на слабите страни на космическия и авиационния мониторинг и получаването на максимум полезна информация за следспътниковия мониторинг. При това следва да се отчитат и съвременните икономически тенденции, свързани с намаляващата финансова стойност на комерсиалните спътници и БЛА.

Реализирането на следспътников авиационен мониторинг изисква формирането на предварителен структурен модел и на операционен модел на БАС. Основните компоненти на предварителния структурен модел на БАС могат да бъдат следните:

- няколко БЛА, като се уточнява за всеки безпилотен апарат типът на платформата, планерът, двигателят и горивото, системата за управление и навигация, целевото оборудване, системата за енергозахранване и системата за спасяване;
- стартови комплекс (ако има такъв);
- НСКУ – състав, основни функции в РМВ, възможности за едновременно управление на БЛА и др.;
- наземен екип за управление (по функции за всеки член на екипа);
- изнесени пунктове с различно предназначение;
- осигуряващи средства и персонал (включително техническо обслужване и ремонт).

Всеки от изброените компоненти на предварителния структурен модел е обект на отделен анализ. Така например по първия от тях, както е известно, съвременните БЛА се реализират на два типа платформи – от самолетен или вертолетен тип. Ако обектът за мониторинг е на голямо разстояние от НСКУ и е със значителни линейни размери (например, нефтопроводи, газопроводи, железопътни линии и др.) е целесъобразно използването на БЛА от самолетен тип. В противен случай е удачно изпращането на БЛА от вертолетен тип, които могат да „зависват“ над обекта за мониторинг и да работят в тези ограничени условия.

По отношение на целевото оборудване за реализиране на следспътниковия мониторинг БЛА за наблюдение могат да използват камери с различен физически принцип на действие [9], както и други технически средства. Осовите им представители могат да бъдат следните:

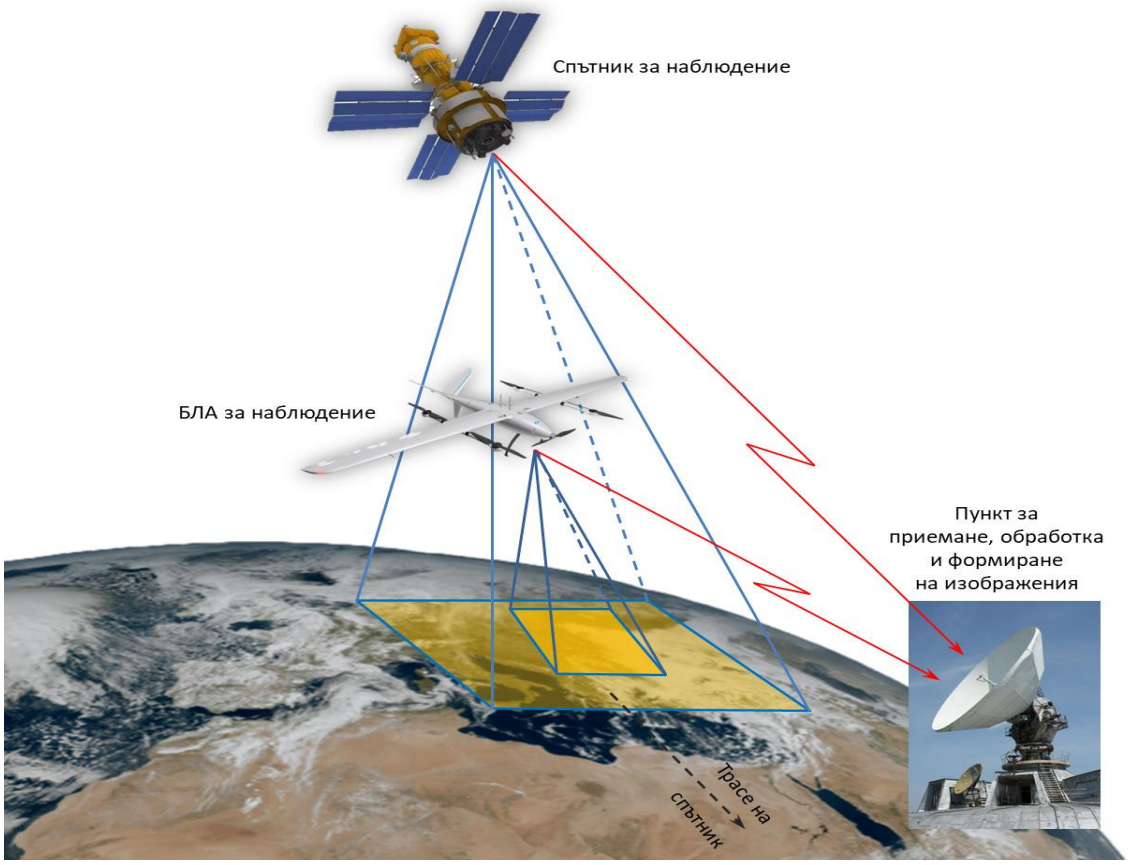
- оптични камери, известни като RGB-камери, функциониращи във видимия спектър на електромагнитните вълни – червен, зелен и син (подобно на възприемането на света от човешкото око);
- топловизионни камери, регистриращи инфрачервеното излъчване на обекта за мониторинг;
- мултиспектрални камери, фиксиращи изображения в няколко спектрални диапазона (вкл. видимия, инфрачервения и ултравиолетовия спектър);
- хиперспектрални камери, фиксиращи изображения в стотици тесни спектрални диапазона;
- лидарни системи, излъчващи лазерни импулси за измерване на разстояния и създаване на 3D-модели на обекта за мониторинг и на местността;
- газ-анализатори на различни газови смеси.

В състава на целевото оборудване, основно на някои тежки военни БЛА, е включена и бордна радиолокационна станция (БРЛС), включително със синтезирана апертура (БРЛС СА), осигуряваща радиолокационни изображения на обекта за мониторинг, независими от условията на времето и денонощието.

Следва да се отбележи, че редица съвременни спътници за наблюдение разполагат с камери от посочения по-горе тип, включително и с БРЛС СА [7].

На основата на предварителния структурен модел се предлага операционен модел на БАС, отразяващ отделните етапи и събития в процеса на функционирането на системата за следспътниктов мониторинг чрез БЛА. Операционният модел на БАС включва следните етапи:

- транспортиране на компонентите на БАС от постоянното място за базиране и разполагането им в района за извършване на мониторинг;
- излитане на БЛА от писта (площадка) или стартиране (катапултиране);
- набор на височина и полет на БЛА към обекта/района за извършване на мониторинг;
- извършване на следспътников авиационен мониторинг на съответния обект/район с помощта на целевото оборудване на БЛА и получаване на информация в НКСУ в РМВ (фиг.1);
- полет на БЛА към пистата (площадката за кацане) или към района за спасяване;
- кацане (спускане с парашут) или кацане в мрежа;
- събиране, натоварване на компонентите на БАС и транспортирането им до постоянното им място за базиране.



Фиг. 1. Съвместно синхронизирано използване на спътници и БЛА
за наблюдение на обекти/райони от земната (морската) повърхност

Изложеното дотук по своя смисъл е част от първоначалната постановка на задачата за избор на БЛА за следспътников мониторинг на зададени обекти/райони.

На фиг. 1 ясно се открояват полезренията на спътника за наблюдение и на БЛА за наблюдение като пространствени ъгли, в границите на които се получават изображения (сцени) на повърхността на Земята или морето. Всяко от тях е изобразено с три непрекъснати и една прекъсната линия. Съгласно теорията на ДИ от полезрението на спътника или БЛА за наблюдение зависи полосата (ивицата) на заснемане и полосата (ивицата) на обзора, които са в основата на редица разчети и оценки с различни приложения.

Показаното на фиг. 1 илюстрира комплексен синхронен аерокосмически експеримент (мониторинг) за ДИ на Земята [1, 5], в който (в класическата му структура) отсъства третото ниво – наземните измервателни комплекси. При това не е задължително БЛА за наблюдение да прелита над обекта/района за мониторинг едновременно със спътника за наблюдение.

Следспътниковият авиационен мониторинг с използване на БЛА е целесъобразно да е синхронизиран с космическия мониторинг и да се извършва след получаване на изображение на съответния обект/район от спътника за наблюдение. При това времевият цикъл на БЛА за наблюдение от заснемането до получаването на изображението е няколкратно по-малък от този на спътниците за наблюдение. По-конкретпно, след получаване на изображение (сцена) на съответния обект/район от спътника за наблюдение, може да се наложи детайлизиране на получената сцена и повишаване на нейната информативност. **В зависимост от размерите на сцената се определя район за търсене на БЛА за наблюдение, а в съответствие с обекта за мониторинг – целевото оборудване на БЛА и способа за търсене на обекта за мониторинг.** След заснемането му от БЛА за наблюдение получената информация се изпраща в Пункта за приемане, обработка и формиране на изображения (фиг. 1). Тук се извършва комплексна обработка на информацията, получена от спътника и БЛА за наблюдение, като се отчитат предимствата и недостатъците на двата типа изображения чрез съвместната им обработка по определен алгоритъм, както и формирането на крайното изображение на обекта за мониторинг [2].

Целевите задачи, решавани от БЛА при следспътников мониторинг на кризисни обекти и процеси от невоенен характер, могат да бъдат следните:

- ранно откриване и предупреждение за пожари в ненаселени места;
- ранно откриване и предупреждение за наводнения в ненаселени места;
- ранно откриване и предупреждение за техногенни аварии;
- оценка на радиационната обстановка в районите на АЕЦ;
- екомониторинг, т. е. измерване на чувствителни елементи на атмосферата и откриване на замърсявания от различен характер;
- участие в охраната и контрола на критичната инфраструктура на страната - енергийна (нефтопроводи, газопроводи и др.) и транспортна;
- наблюдение и оценка на миграционни и бежански потоци в страната и извън нея;
- идентифициране и следене движението на нефтени петна и други продукти в акваторията на Черно море, по р. Дунав и другите по-големи реки в страната, в РМВ;
- оценка на щетите от природни бедствия и техногенни аварии;
- ранно откриване на бедстващи хора на територията и акваторията на страната (спасителни операции);
- информационно осигуряване на хуманитарни операции и др.

Всяка от формулираните задачи може да се декомпозира на по няколко съставни задачи. Очевидно е, че изброените по-горе задачи, решавани с помощта на БЛА, имат значимо хуманитарно, антикризисно и икономическо значение за страната.

Реализирането на следспътников авиационен мониторинг в нашата страна с използване на БЛА ще осъвремени и повиши качеството на информационното осигуряване на икономиката, екологията, хуманитарната област и на военното дело. Ще се модернизира и въздушния компонент на Националната система за ранно предупреждение за възникване на кризи и конфликти от различен характер.

Литература:

1. Гецов, П. Национална аерокосмическа система за мониторинг и защита от природните екокатастрофи, С., акад.изд. проф. Марин Дринов, 2000 г., стр. 7, 18–19, 23
2. Илиев. Т. Комплексно използване на авиационни и космически системи и средства за наблюдение при информационно осигуряване в съвременните операции. Дисерт. труд за присъждане на ОКС „доктор“, С., ВА „Г. С. Раковски“, 2020, стр. 98, 157
3. Концепция за изграждане на Център за аерокосмическо наблюдение, контрол и управление, С., ИКИТ-БАН, 2025, стр. 6–7
4. Мардиросян. Г. Въведение в космонавтиката, С., изд. проф. Марин Дринов, 2023 г., стр.144–173
5. Мардиросян. Г. Природни екокатастрофи и тяхното дистанционно аерокосмическо изучаване С., изд. на БАН, проф. Марин Дринов, 2023 г., стр. 113–115
6. Пенев. П. Космос и сигурност, С., Витал, 2014 г., стр. 345
7. Пенев. П. Военни аспекти на използването на космоса, С., Изд. на БАН „проф. Марин Дринов“, 2025 г., стр. 312, 340–342, 359–377
8. AVIATION WEEK & SPACE TECHNOLOGY, 2024–2025
9. https://navgeotech.com/ru/bpla-i-kamery/
10. https://eos.com/ru/products/high-resolution-images/

ОЦЕНКА НА КРИТИЧНАТА ИНФРАСТРУКТУРА ОТ ИНДУСТРИАЛНАТА ЗОНА НА ГРАД ДЕВНЯ И НА ЗОНАТА НА АСПАРУХОВИЯ МОСТ НА ГРАД ВАРНА ЧРЕЗ ЛЕТАТЕЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ С БЕЗПИЛОТЕН ЛЕТАТЕЛЕН АПАРАТ

Георги Желев[1], Недко Димитров[3], Георги Сотиров[1], Павел Пенев[1], Зоя Хубенова[1], Константин Методиев[1], Росен Димитров[2], Андон Андонов[2], Елена Разказова[4], Апостол Апостолов[4]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Военна академия "Георги Стойков Раковски" – София
[3]Висше военноморско училище "Никола Йонков Вапцаров" – Варна
[4]Институт по инженерна химия – Българска академия на науките
e-*mail: gsotirov@space.bas.bg; ppenev@space.bas.bg*

Ключови думи: *Аеромониторинг, критична инфраструктура, безпилотни летателни апарати, TV-камери, IR-камери, газови анализатори*

Резюме: *Избран е БЛА със съответни сензори за оценка на критична инфраструктура в района на град Варна. Определени са неговите пространствени и времеви параметри за провеждане на летателен експеримент, включително на маньовъра „галсиране". Анализирани са синхронни видео и термоизображения на обекти от критичната инфраструктура, както и специализирани измервания с помощта на газ-анализатор. Формулирани са препоръки по тази проблематика.*

ASSESSMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE IN THE INDUSTRIAL ZONE OF THE CITY OF DEVNYA AND THE ASPAROUHOV BRIDGE AREA OF THE CITY OF VARNA THROUGH AN AERIAL EXPERIMENT WITH AN UNMANNED AERIAL VEHICLE AIRCRAFT

Georgi Jelev[1], Nedko Dimitrov[3], Georgi Sotirov[1], Pavel Penev[1], Zoya Hubenova[1], Konstantin Metodiev[1], Rosen Dimitrov[2], Andon Andonov[2], Elena Razkazova[4], Apostol Apostolov[4]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Georgi Stoykov Rakovski Military Academy – Sofia
[3]Nikola Yonkov Vaptsarov Naval Academy – Varna
[4]Institute of Chemical Engineering – Bulgarian Academy of Sciences
e-*mail: gsotirov@space.bas.bg; ppenev@space.bas.bg*

Keywords: *Aerial monitoring, critical infrastructure, unmanned aerial vehicles, TV cameras, IR cameras, gas analyzers*

Abstract: *A UAV with appropriate sensors was selected for assessing critical infrastructure in the Varna area. Its spatial and temporal parameters for conducting a flight experiment, including the "gliding" maneuver, were determined. Synchronous video and thermal images of critical infrastructure objects were analyzed, as well as specialized measurements using a gas analyzer. Recommendations on this issue were formulated.*

Въведение

Терминът „критична инфраструктура“ (КИ) е въведен в българското законодателство през 2005 г. с приемането на Закона за управление при кризи, а КИ включва обекти с потенциална опасност за персонала и населението. Република България поддържа регистър с обектите от КИ, групирани по сектори. Върху тези сектори с КИ [2] могат да бъдат експонирани преднамерени и непреднамерени заплахи, част от които са природни бедствия и техногенни аварии. Реализирането на този тип заплахи може да окаже физическо разрушително въздействие и косвено разрушително въздействие. В тази връзка своевременното откриване на заплахите и контрола на състоянието на обектите от КИ са особено важни за предотвратяване и борба с последствията от инциденти със сигурността и безопасността. Основен способ за откриването им е добиването на информация чрез мониторинг, наблюдение и регистриране на отклонения на специфични параметри.

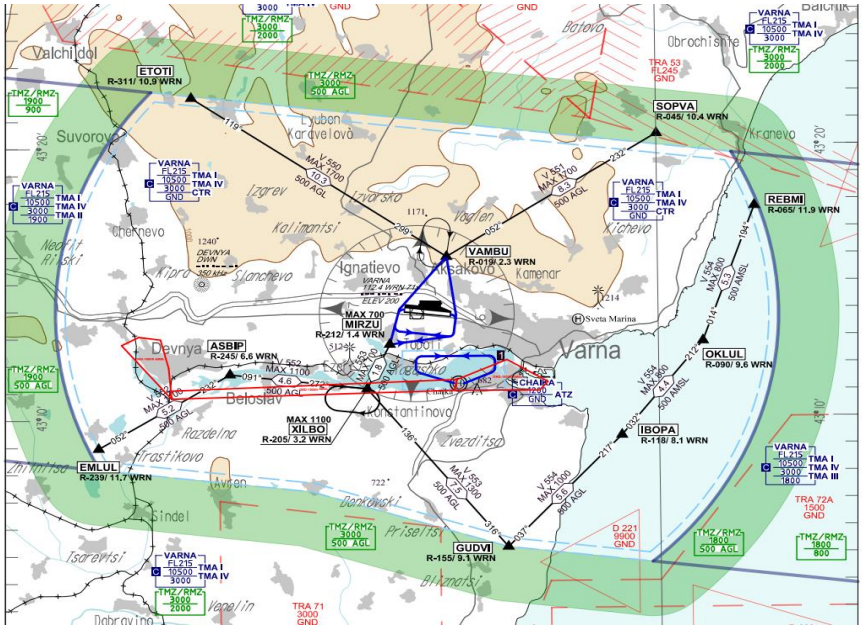
През последните десетилетия на XXI век като особено актуален и ефективен се очертава авиационният мониторинг (аеромониторинг) на природни бедствия и техногенни аварии и катастрофи, въздействащи върху КИ [4], на основата на безпилотни летателни апарати (БЛА). При това аеромониторингът, т. е. въздушното наблюдение и контрол на обекти, явления и процеси, понастоящем е една от основните функции на съвременните БЛА.

През месец октомври 2025 г. екип специалисти от Института за космически изследвания и технологии – БАН (ИКИТ-БАН), Военна академия „Г. С. Раковски“ (ВА „Г. С. Раковски“), Висшето военноморско училище „Н. Й. Вапцаров (ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“) и Института по инженерна химия – БАН (ИИХ-БАН) проведе летателен експеримент в района на гр. Варна, свързан със задача 1.1.6 на Националната научна програма „Сигурост и отбрана“, с използване на БЛА за аеромониторинг и специализирани измервания на обекти от КИ.

В съответствие с Плана за защита при бедствия на област Варна от 2020 г. [3], в който са формулирани 16 заплахи за КИ от различен характер, за провеждане на летателния експеримент с БЛА, чрез експертна оценка бе избран район Варна – индустриалната зона на град Девня и зоната на Аспаруховия мост. Целта на летателния експеримент бе заснемане и специализирани измервания на обекти от КИ на индустриалната зона на град Девня и на зоната на Аспаруховия мост с прилежащия остров, с използване на БЛА тип крило на българската фирма „Фрага Х“, управляван от екип на ВА „Г. С. Раковски“.

Организиране на летателния експеримент, целево оборудване (полезен товар) на БЛА, параметри на въздушното наблюдение и ред за провеждане на полета

Летателният експеримент бе организиран и проведен през месец октомври 2025 г. от горепосочените научни организации, в тясна координация с ДП РВД, летище Варна, ВМС и общинските управи на град Варна и град Девня. При това за изпълнение на полета с БЛА бяха създадени три временни отделени зони, разположени южно от магистралата София – Варна (фиг. 1), обявени с NOTAM.



Фиг. 1. Схема за изпълнение на летателния експеримент с БЛА в района на град Варна

За реализиране на летателния експеримент бе подготвен БЛА тип крило с общо тегло до 25 kg и силова установка, включваща бензинов и електрически двигатели. Този БЛА, развиващ максимална скорост 200 km/h, бе оборудван с три вида полезен товар – съответно TV-камера, IR-камера и газ-анализатор, като резолюцията на видеокамерата (TV-камерата) е 1920/1080 пиксела на кадър, а на инфрачервената камера (IR-камерата) – 640/480 пиксела на кадър. Предназначението на газ-анализатора е регистриране на азотни окиси (фиг. 2).

Фиг. 2. Интегриран полезен товар на БЛА

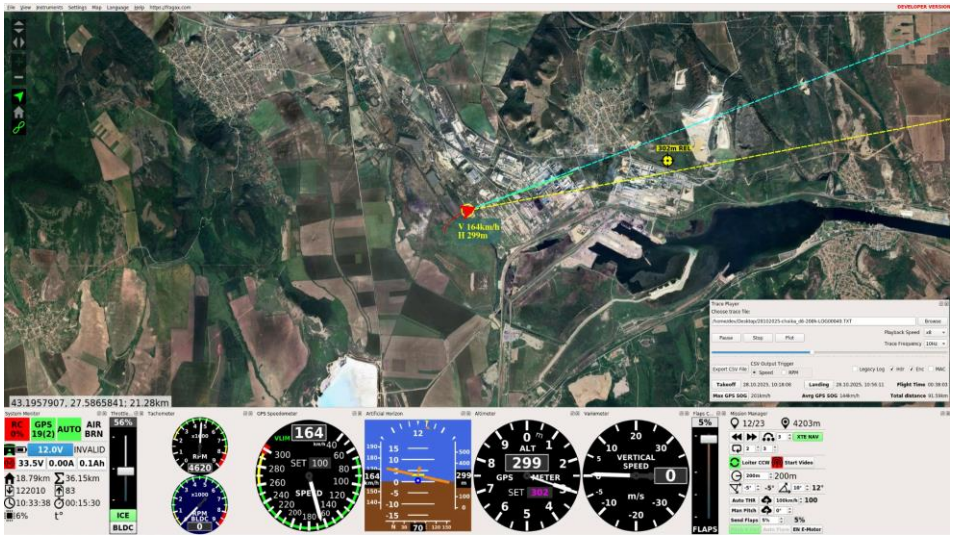
Бяха обосновани пространствените и времеви параметри на въздушното наблюдение на БЛА, осигуряващи провеждането на летателния експеримент, както следва: площи на обследваните райони на индустриалната зона на град Девня и зоната на Аспаруховия мост съответно 7,2 km^2 и 1,2 km^2; производителност на наблюдението при скорост на БЛА 160 km/h – 2,7 km^2/min; дължина на отсечката от „галса“ – 3 km; време на завоя на БЛА на 180° - 30 s; време на облитане на индустриалната зона на град Девня – 9 min 40 s; време на облитане на зоната на Аспаруховия мост – 4 min 15 s. При това следва да се отбележи, че галсът е понятие, възприето в авиацията от корабоплаването [1], като в авиационната област той представлява отсечка от пътната линия на БЛА от завой до завой с променлив курс между завоите. При това галсовете е прието да се номерират – първи, втори и т. н.

В град Варна във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“ участниците в летателния експеримент (от ИКИТ-БАН, ВА „Г. С. Раковски“, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“ и ИИХ-БАН), в присъствието на представители на община Варна и община Девня, бе проведен координационен брифинг.

На следващия ден в авиобаза „Чайка“ на ВМС на една от стоянките на вертолетите бе извършено сглобяване на БЛА и техническа предполетна подготовка за проверка на функционирането на системите му, включително на сензорната апаратура, както и проверка на електромагнитната съвместимост.

Координирано с ДП РВД и летище Варна, при усложнена метеорологична обстановка (пулсиращ вятър до 22 m/s с посока Запад-Изток), бе извършено излитане на БЛА от стоянка на авиобаза „Чайка“, с последващ набор на височина 300 m над прилежащото Варненско езеро. Съгласно щурманския план на полета (отделно представен на ДП РВД и летище Варна) БЛА се насочи към индустриалната зона на град Девня, разположена южно от магистралата София – Варна, където се намират содовия завод „Солвей соди“, химическият завод „“Агрополихим“, пристанище „Варна-Запад“ и други обекти от КИ. В тази зона с размери около 3 на 2,4 km, съответно южно и източно спрямо магистралата, БЛА извърши четири маньовъра „галсиране“.

При изпълнение на галса на височина 300 m, предвид обстоятелството, че видеокамерата захваща ширина на полосата от земната повърхност 1 km (ъгъл на полезрение 120°), се установи препокриване между вътрешните „галсове“ около 250 m. Едновременно с видеокамерата при изпълнение на горепосочените маньоври на борда на БЛА функционираше и инфрачервената камера, като се използва и газ-анализатор (фиг. 3).



Фиг. 3. Телеметрични данни на полета над индустриална зона Девня

След облитането на индустриалната зона на град Девня БЛА се насочи към зоната на Аспаруховия мост на град Варна с разположения под него остров, като в тази зона извърши два маньовъра „галсиране“ спрямо моста (фиг. 4).

Фиг. 4. Телеметрични данни на полета към Аспаруховия мост

След завършване на облитането на зоната на Аспаруховия мост на град Варна БЛА осъществи маньовър за снижение и изпълни кацане при усложнена навигационна обстановка в авиобаза „Чайка”. Продължителността на полета бе 42 min, като целевата апаратура на БЛА функционираше 33 min 45 s.

Последва следполетно обслужване и снемане на данните от сензорната апаратура за наблюдение и специализираните измервания.

След завръщане в град Варна бяха представени предварителните резултати от извършения полет с БЛА над обекти от КИ.

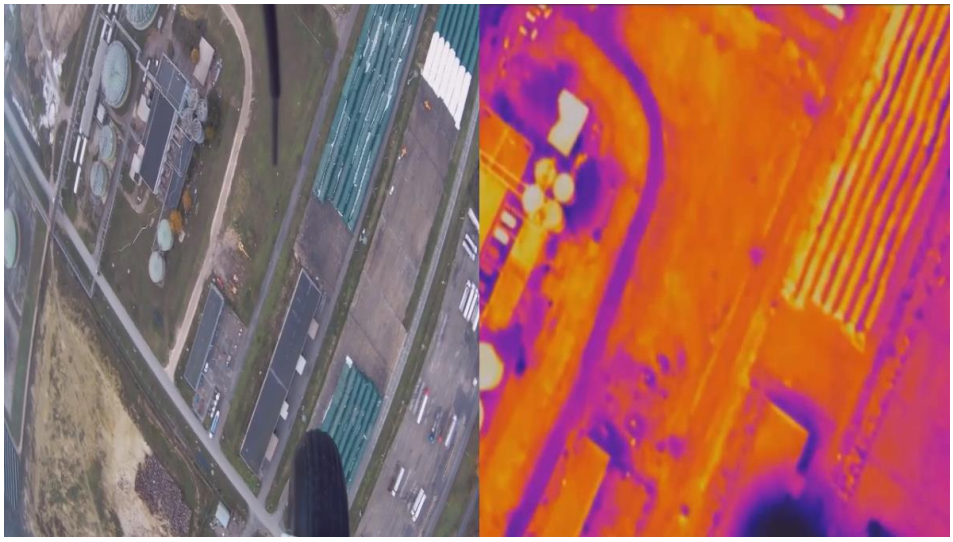
Анализ на резултатите от летателния експеримент с БЛА

Предвид обстоятелството, че в индустриалната зона на град Девня и в зоната на Аспаруховия мост на град Варна са разположени множество обекти от КИ, в съответствие с възможностите на целевото оборудване на БЛА, за анализ на резултатите от летателния експеримент са избрани няколко обекта от КИ. При това се отчита, че ъгълът на полезрение на видеокамерата е по-голям от този на инфрачервената камера.

На фиг. 5 са показани съответно в ляво и в дясно, синхронно видеоизображение и термоизображение на химическия завод „Агрополихим“ за производство на азотни съединения

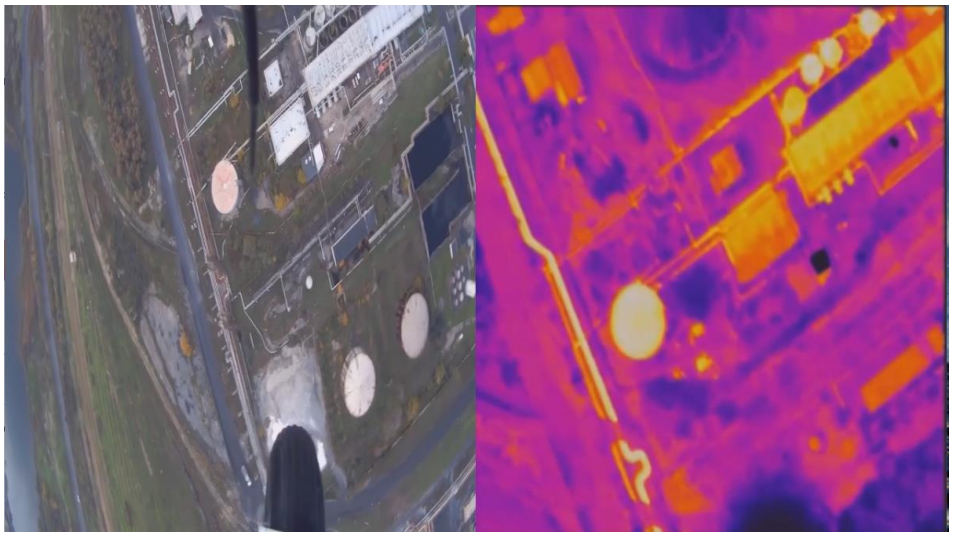
и торове, разположен в индустриалната зона на град Девня (кв. Повеляново). По-конкретно, в левия горен край на фигурата на термоизображението се наблюдават горещи петна от северната част на завода – покривни конструкции и цистерни.

Освен това на фиг. 5 се вижда, че поради ниските температури и валежа през деня на провеждания летателен експеримент, наблюдавания на видеоизображението път и прилежащите локви се открояват на термоизображението с по-ниска температура от околната растителност.



Фиг. 5. Видеоизображение и термоизображение на химическия завод „Агрополихим“

На фиг. 6 са показани видеоизображение и термоизображение на цистерни на ТЕЦ-Варна, разположени на западния край на Варненското езеро (12 km от град Варна).

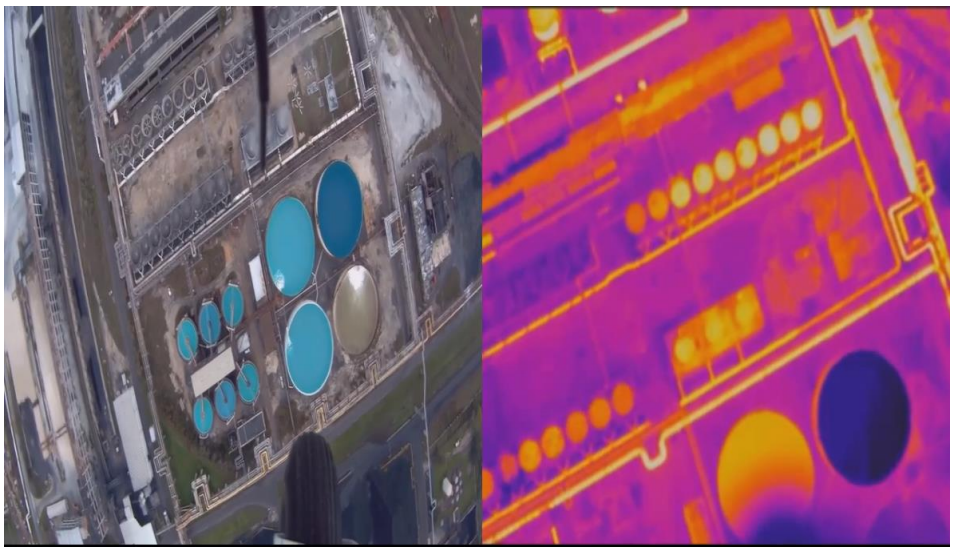


Фиг.6. Видеоизображение и термоизображение на цистерни на ТЕЦ „Варна“

На термоизображението в ляво от цистерната ясно се разграничава тръбопровод, а в долния му край – компенсатора за линейно разширение.

На фиг. 7 са показани видеоизображение и термоизображение на содовия завод „Солвей Соди“, който е най-големия завод за сода в Република България и най-големия производител на калцирана сода в Европа.

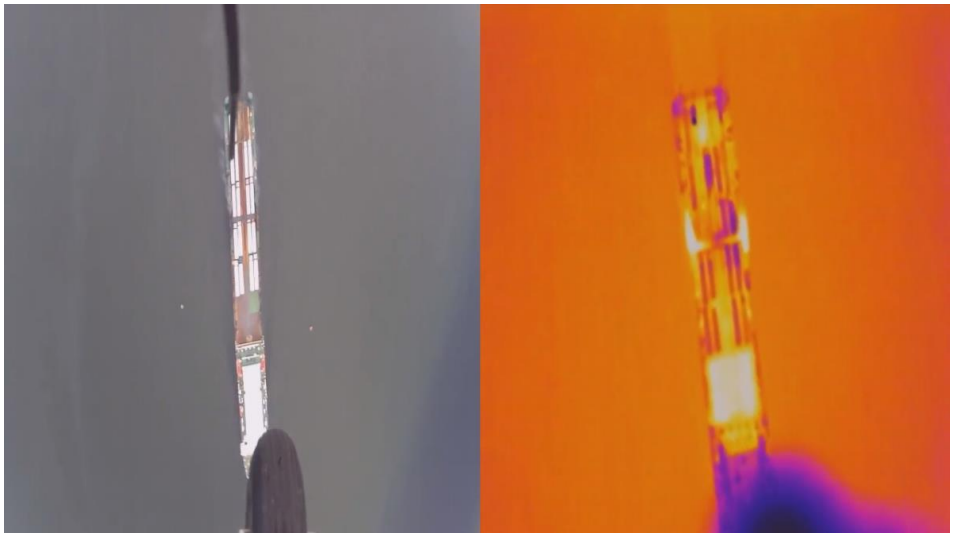
В долния десен край на термоизображението се откроява, вероятно, пълна с вода цистерна (поглъща лъченията), а в горния край на термоизображението се наблюдава системата от тръбопроводи на содовия завод и отделни водни повърхности (локви, езера и др.).



Фиг. 7. Видеоизображение и термоизображение на содовия завод „Солвей Соди“

На фиг. 8 са показани видеоизображение и термоизображение на кораб-ферибот, плаващ по канала Варна-Девня.

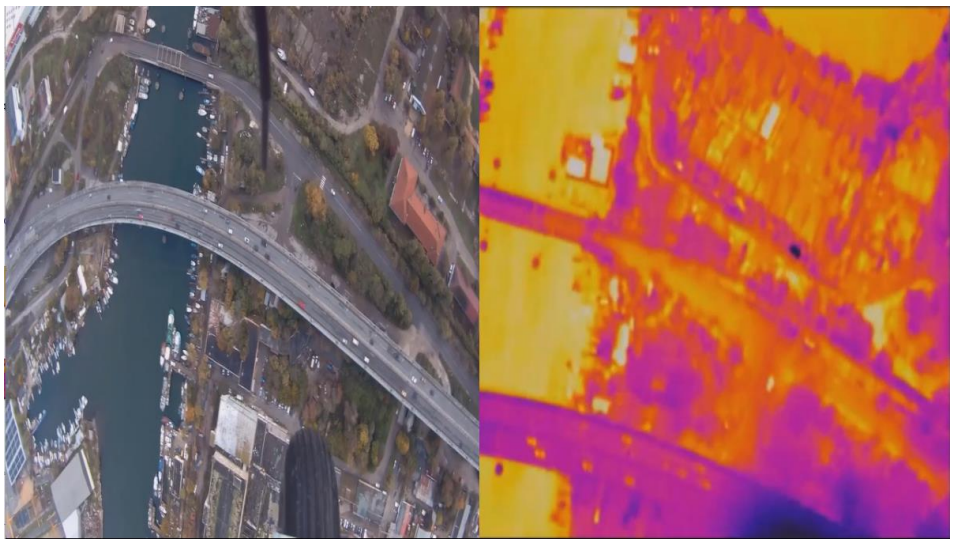
Както е известно, фериботният комплекс „Варна“, разположен на 30 km западно от Варна, е с възможности за едновременна обработка на два типа фериботни кораба с широчина 26 m × 22 m. При това на корабите-фериботи се транспортират железопътни вагони от различен тип.



Фиг. 8. Видеоизображение и термоизображение на кораб-ферибот

От фиг. 8 се вижда, че в долния край на термоизображението е разположено машинното отделение на кораба-ферибот (с най-висока температура – в бяло), а по средата на термоизображението – вероятно дюзи за отработените газове.

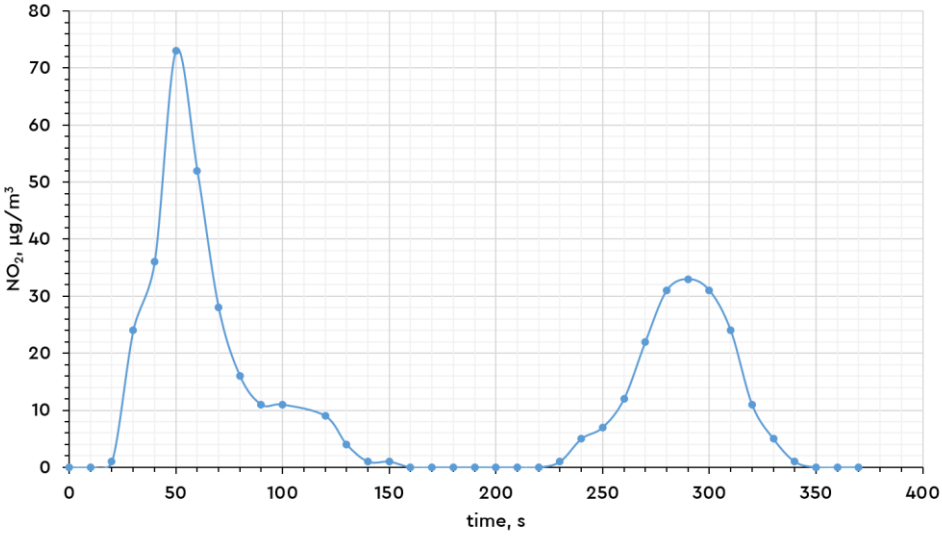
На фиг. 9 са показани видеоизображение и термоизображение на Аспаруховия мост в гр. Варна, свързващ Варненското и Белославското езеро с Черно море чрез плавателен канал, както и кварталите Аспарухово и Галата с централната част на града. При това общата дължина на Аспаруховия мост е 2050 m, ширината му е 21 m, а височината – 52 m. Главният му отвор е широк 160 m.



Фиг. 9. Видеоизображение и термоизображение на Аспаруховия мост

На фиг. 9 в средния и горния ляв край на термоизображението се наблюдават работещи предприятия, а в долния край – движещи се коли. Южно и северно от Аспаруховия мост се забелязват съответно един и четири кораба, плаващи по канала.

Специализираните измервания на замърсявания на обекти от КИ с използване на газ-анализатор MRU Optima 7 бяха извършени при полета на БЛА над южната част на индустриалната зона на град Девня (южно от магистралата София-Варна). На фиг. 10 са показани два пика на кривата на замърсяване с азотен диоксид в зависимост от вектора на движение на БЛА.



Фиг. 10. Зависимост на концентрацията на замърсителя NO_2 от времето на полета на БЛА и вектора на движението му

По-големият пик на фиг. 7, т. е. с по-високата концентрация на NO_2, се отнася за случая, когато БЛА лети перпендикулярно на магистралата София-Варна (от Североизток към Югозапад) и навлиза във въздушното пространство на азотно-торовия завод „Солвей соди“.

По-малкият пик на фиг. 7, т. е. с по-ниската концентрация на NO_2, се отнася за случая, когато БЛА лети на Изток и се отдалечава от азотно-торовия завод „Солвей соди“, т. е. се завръща към град Варна.

Не е установено наличието на фини прахови частици, вероятно поради преминаването на атмосферен фронт през района.

Както в авиобаза „Чайка“, векторът на вятъра в района на специализираните измервания на замърсявания над южната част на индустриалната зона на град Девня бе в посока Запад-Изток.

Заключение

Резултатите от летателния експеримент с БЛА позволяват да се направят следните изводи:

1. При съпоставяне на видеоизображения и термоизображения на обекти от КИ, заснети с използване на БЛА, се наблюдава многоспектърно инфраструктурата (топлопроводи, цистерни, работещи машини и др.) и състоянието й, както и периметъра на обектите.
2. В редица случаи получените термоизображения при наблюдения от БЛА на различни обекти от КИ са по-информативни и актуални от съответните видеоизображения.
3. Проведеното измерване с портативен газов анализатор MRU Optima 7 показа наличие на NO_2 над територията на химическия завод „Агрополихим“, чиято максимална концентрация бе 73 $\mu g/m^3$, което към дадения момент не превишаваше пределно допустимите концентрации.

Тази публикация е финансирана от Министерството на образованието и науката в изпълнение на Националната научна програма „Сигурност и отбрана“, приета с РМС №731 от 21.10.2021 г и съгласно Споразумение № Д01—74/19.05.2022 г.

Литература:

1. Военный энциклопедический словарь (Авторски колектив).М., Рипол Классик, 2002
2. Димитров, Н. Системен подход към критичната инфраструктура. В., ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, 2019
3. План за защита при бедствия на област Варна, Община Варна, 2020 г.
4. Хубенов Е., Сотиров Г., Алексиев К., Хубенова З. Системи за мониторинг на критичната инфраструктура с елементи на изкуствен интелект. С., Издателство на БАН „Проф. Марин Дринов“, 2025, 310 стр.
5. AVIATION WEEK & SPACE TECHNOLOGY, 2024–2025.

INFORMATION FLOWS AND INTELLIGENT PROCESSING IN CLUSTERS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

Evgeni Hubenov, Zoya Chiflidzhanova, Georgi Sotirov

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

Keywords: *cluster, critical infrastructure, monitoring system, network-centric architecture, artificial intelligence*

Abstract: *We propose a methodology for transforming data into information objects that build a complete operational picture of a node with common interests within a cluster of a critical infrastructure monitoring system. The real-time processing and visualization of information object flows is based on network-centric architecture principles. The synthesized structure allows for the introduction of artificial intelligence and machine learning elements to generate predictive models for situational awareness and decision optimization.*

ИНФОРМАЦИОННИ ПОТОЦИ И ИНТЕЛИГЕНТНА ОБРАБОТКА В КЛЪСТЕРИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА КРИТИЧНА ИНФРАСТРУКТУРА

Евгени Хубенов, Зоя Чифлиджанова, Георги Сотиров

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

Ключови думи: *клъстер, критична инфраструктура, система за мониторинг, мрежово-центрична архитектура, изкуствен интелект*

Резюме: *Предложена е методология за трансформиране на данни в информационни обекти, които изграждат пълна оперативна картина за възел с общи интереси в клъстер от система за мониторинг на критична инфраструктура. Обработката и визуализацията на потоците информационни обекти в реално време е базирана на принципите на мрежово-центричната архитектура. Синтезирана е структура с възможности за въвеждане на елементи на изкуствен интелект и машинно обучение за генериране прогнозни модели за ситуационна осведоменост и оптимизация на решенията.*

A Systems Approach to Critical Infrastructure Monitoring Information Systems

The information systems approach to critical infrastructure monitoring information systems (CIMIS) focuses on the processes of receiving, transporting, processing, and presenting information related to critical infrastructure (C**I**) protection processes. The information interface with other subsystems implies that CIMIS is designed as a communication and information system (CIS).

An organizational-structural approach defines a CIS as a set of technical means (including communication, security, and cryptographic devices; and a medium for signal propagation within system boundaries) and programmatic means (including methods, procedures, and personnel) organized to perform one or more functions of creating, processing, using, storing, and exchanging classified information in electronic form. A CIS is a distributed, spatio-temporal, discrete-event system that includes two interconnected subsystems (communication and information) in its structure, which are designed to transport and process flows of information objects (IOs).

An IO is a structured set of data, either single or composite, that is large and organized enough to be interpreted and processed. IOs can be divided into classes, subclasses, and entities. Each IO's structure also includes metadata, which describes the data's attributes and place of origin and time of creation. Streams of information objects cover different subjects and enter the CIS from

various sources within or related to CI domains. The purpose of CIMIS is to detect, classify, identify, and track CI-related events in a timely manner, providing real-time situational awareness to support CI protection decision-making [1].

Event-driven CISs include hardware and software components that operate simultaneously in different domains of interconnected communication environments. These systems use events as the main object to organize dynamic communication between components and adapt their structure to data flow parameters. The dynamics of these systems relate to the occurrence of physical events at irregular, previously unknown times. Generally, an event is defined as a change in the system's state in discrete state space. In a CIS, various information flows are formed for monitoring and control purposes. Users are interested in changes to monitoring parameters directly related to CIS protection, as well as events related to disasters, accidents, and catastrophes. To maintain the CIS's functional characteristics and support the system operator, it is important to understand the information flows resulting from the CIS's interaction and interdependence with other elements of the information space (IS).

The Network-centric nature of critical infrastructure monitoring information systems

The Network-Centric Environment (NCE) is an information interaction framework that provides full human and technical connectivity. This allows all users to share information as needed and in the required format to perform their functions. The NCE's principles, capabilities, and attributes are divided into two domains: the knowledge domain and the technical domain.

The purpose of CIMIS is to provide information for situational awareness and real-time decision-making related to CI protection. Network-centric warfare is a military doctrine that seeks to transform an information advantage, in part provided by information technology, into a competitive advantage. This is achieved by using robust and effective network and information technologies to access a shared Unified Information Space (UIS). The UIS is defined as a system of information objects (IOs) aggregated into thematic clusters that are formed and modified by information exchange in a secure communication environment [2, 3].

The United States Department of Defense first introduced the doctrine in the 1990s. CIMIS is implemented during events such as disasters, accidents, and terrorist attacks when initial information or accurate predictions are lacking, as well as during wartime.

The network-centric systems approach defines the specific characteristics of the CIMIS information structure in the communication subsystem (i.e., the common transport network environment), the sensor area (i.e., sensors that convert physical parameters into data and sensor network access), and the control area of the technical means for collecting sensor data. A mandatory subsystem is dedicated to network and service management and monitoring. All subsystems must be accessible through the common transport environment.

Characteristics of a Critical Infrastructure Monitoring Information System

The network-centric system approach defines the specific characteristics of the information structure of CIMIS:

- CIMIS subsystems include the communication subsystem (common transport network environment), the sensor domain (which includes sensors that convert physical parameters into data and a sensor access network), and the control domain of technical means for acquiring sensor data. A mandatory subsystem manages and monitors CIMIS networks and services.
- The common transport environment must ensure the security of information and the protection of data and network transport. The monitoring system must provide remote access to information and management of system functionalities, including control.
- CIMIS services shall be defined and described by means of access and user rights, and they may be used at any point in the address space of the communication environment. The service registry shall specify the access method, service provider, processes that create the service, and information objects on which the service is based.

Information and Communication Cluster

Adopting Internet technologies, such as the TCP/IP architecture as the network model and protocol stack, is the basis for building a network-centric CIMIS. In a generalized form, its structure consists of functionally complete information and communication clusters (ICCs). The backbone network's communication architecture should ensure the operation of mobile and stationary information clusters and integration with other systems, such as the space segment and national networks related to CI protection. It should also be open to presenting results on the Internet. The

communication subsystem with mobile ICCs includes management of unmanned aerial vehicles (UAVs) and unmanned aerial systems (UASs). The network-centric requirements necessitate the use of a virtual private network (VPN) and transport technologies over the Internet. Mobile ICCs require Internet protocol transport over public mobile data networks (5G/4G). In areas without national mobile network coverage, satellite internet or internet protocol transport over a radio channel can be used. All ICs must be connected to the IP backbone. From an organizational and technical standpoint, ICCs are elements of the CI system that provide mobile groups for specific CI management and operational activities. For example, they are used in firefighting scenarios, search activities, and chemical pollution measurements.

Structure and Topology of a Network with Mobile ICCs for CI Monitoring

OpenVPN technology was selected as the virtual private network backbone. Its benefits and features are described in relation to a mobile ICC's specificity in the UAS composition and connectivity to a processing and presentation cluster. OpenVPN technology provides ICC integration in a common environment, as well as scalability, manageability, redundancy, facilitated migration, reliability, and backbone network evolution. Based on this, information object flows can be transported, and a functional CIMIS structure can be established.

The ICC structure, defined by the system's purpose, is hierarchical with a local degree of centralization (the UAV Control Center) and regional, with groups of UAVs connected to the global Internet network. Connecting to the Internet provides data transport, and the virtual private network provides a network-centric environment. By its nature, the network is an element of an open CIMIS, connected to the Internet and with the necessary level of data protection. A suitable logical network structure adequate for the project objectives is a star type with an OpenVPN server (control center) and a hierarchy of several ICCs. UASs can also be considered clusters or groups of clusters with a high degree of mobility. They provide flight control of multiple UAVs and deliver data from mobile or spatially distributed sensors, aggregating it into IOs [4].

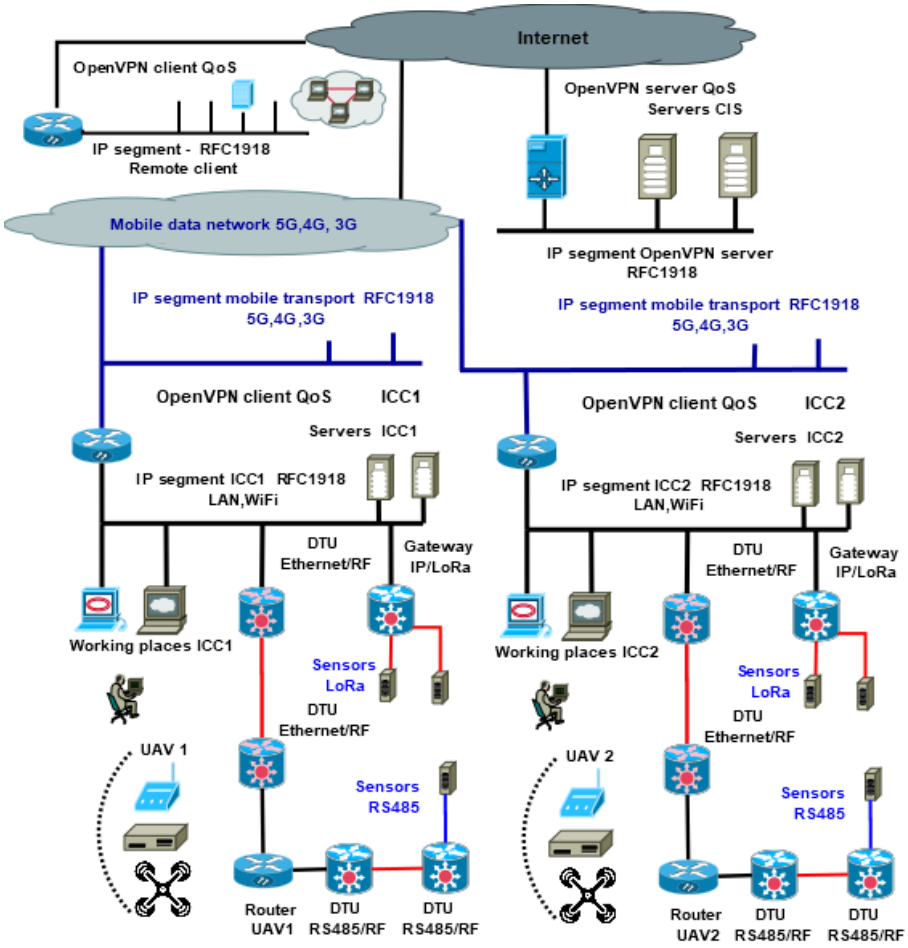


Fig. 1. Network topology of information and communication clusters

The IP segment is "unicast," and the OpenVPN server configures its routing. This ensures the formation of specific ICC groups and the management of communication and information exchange between them. Radio channels are used for IP transport for remote points within the ICC that need to use addresses from the internal IP segment. This provides IP control to the UAV for flying sensors and to IP gateways for the sensor network.

Fig. 1 shows the topology of the ICC network. Two ICCs are shown to illustrate how the number of mobile teams and sensor fields can be increased through horizontal scaling, or by adding more ICCs. Increasing the number of supported ICCs is achieved through vertical scaling of the OpenVPN servers and the servers supporting the CIMIS services (i.e., communication and computing resources). The two ICCs differ in their networking and internet access due to their different certificates, access keys, and private internal IP network segments. Management of connectivity and data exchange between the two ICCs is done via a centralized routing configuration in the OpenVPN server.

In a network-centric environment, it is necessary to isolate a compromised ICC from the virtual network in the event of a UAV or router loss, for example. For the selected network technology, this is accomplished by disabling the corresponding certificate and excluding the OpenVPN client network segment routing tables from the OpenVPN server configuration. Fig. 1 illustrates two types of IP gateways to the sensor network (in this case, the topology is LoRa). One gateway is connected directly to the Ethernet segment at the ECC control point, and the other is connected via the radio channel used to control the UAV and access the IP/RS485 gateway carried by the UAV as a payload.

Community of Interest (COI) and COI Node

The system architecture adheres to the principles of Network-Centric Architecture (NCA), as defined in the United States Department of Defense (DoD) and NATO doctrines, and adapts them to the needs of civil crisis management. In this model, each information cluster represents a community of interest (COI) or COI node.

The COI node is fully functional and provides a group of users united by a common mission or geographical area with all the necessary information support. For the sake of specificity, we will assume that the COI users are two groups of firefighters working in neighboring geographical areas. Mobile ICCs provide information services with a mobile sensor network and UAVs for visual surveillance and aggregating sensor data. This forms a collaboration environment (or federation), which allows for the exchange of information and coordination between different COI nodes. Fig. 2 shows the formation of information flows within the COI.

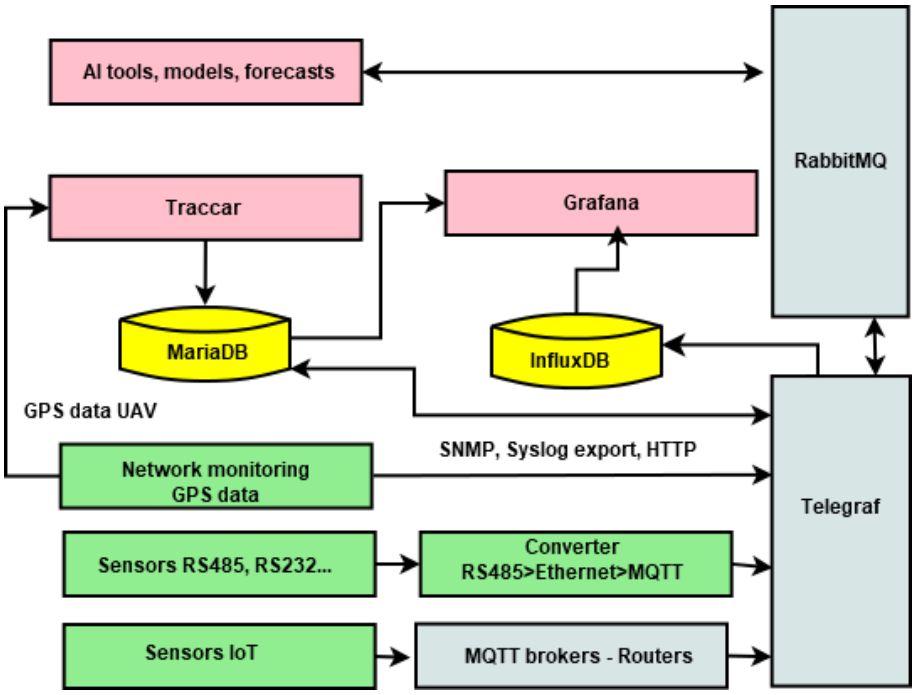


Fig. 2. Iinformation flows within the COI

Various edge-to-core data pipelines have been defined to formalize the flow of information from sensor networks on the periphery to central visualization systems. Visualization for COI information services manages specific processes, such as firefighting. The UAV payload operator evaluates data from the sensor field and video surveillance.

CIMIS's goal within the COI Node is to create a Common Operational Picture (COP) and a Shared Information Space within the federation of geographically adjacent COIs. Intelligent decision support is achieved by introducing elements of artificial intelligence (AI) and machine learning to analyze information and generate predictive models. These models form the basis of the Decision Support System (DSS), which is designed to help teams forecast incident development and optimize resources. This is a step towards achieving predictive awareness and self-synchronization.

The composition and structure of the COI node

The COI sensor network field consists of different types of sensors, and remote access is implemented via a radio channel. For sensors with telecommunication interfaces that provide a point-to-multipoint topology (RS485), Data Transfer Units (DTUs) are used. These DTUs are "transparent" to the protocol. The DTUs are UAV-based, and the router has an RS485 bus. The router also acts as an RS485 hub with IP access. Multiple sensors in the COI Node's geographical area can be connected to a single converter via an RS485 hub, reducing the number of wireless modules required. DTU RS232/RF or Ethernet/RF are used for sensors with telecommunication and network interfaces, and they are terminated on the UAV-based router. This method can be used to collect data from large geographic areas when the geographic coordinates of the sensors are known.

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) is an Internet of Things (IoT) standard messaging protocol. Designed for event-driven systems, it uses publish-subscribe technology. The MQTT broker is central to event-based communication. The broker receives data from protocol gateways, and each message is published in a specific "topic" or channel. MQTT clients, such as user applications, visualization systems, and databases, subscribe to these channels and receive real-time data without the need for constant polling.

The built-in publication-subscription structure of the COI Node application supports the MQTT protocol through the use of Telegraf as an MQTT client. The application converts information from MQTT channels into time series metrics, which it then records in databases such as InfluxDB and MariaDB. Telegraf also creates time series from data structures received from various sensors via an MQTT broker. These structures are essentially information objects that can be reused in a network-centric environment. Telegraf's functionalities are provided by specialized plugins.

SNMP (Simple Network Management Protocol) plug-ins are used to monitor the IP network and maintain quality of service (QoS). The routers in the COI's ICC use various technologies to export information for managing, monitoring, and controlling the network in a mobile environment. This process can be summarized as syslog export from different network devices, categorizing by facility and severity, and processing time series data.

The Traccar application is used to provide information about the geographical coordinates of the UAV and the sensors, as well as additional information related to the tasks in the COI, such as the fire front, hot spots, and direction of spread. An HTTP-format API (application programming interface) is available for automated requests from sensors, network devices, and the UAV payload operator.

The UAV payload operator's workspace uses Grafana. This application provides the video monitoring operator with real-time integration capabilities on their desktop. These capabilities include access to cameras located on the UAV, the Traccar screen, UAV movement data, and physical values from sensors. All of this information is simultaneously recorded in databases.

Telegraf collects data from sensors and network devices, as well as observations and data from the payload operator's activities. This data is visualized on the Traccar desktop and stored in InfluxDB and MariaDB databases. A specialized plugin establishes a connection between Telegraf and RabbitMQ. Acting as an information broker, the application processes, stores, and handles streams of information objects formed for COI purposes. There is also the possibility of flexible routing to neighboring COIs or forming a Service Oriented Architecture of CIMIS [5, 6].

Data from RabbitMQ is stored in databases to create machine learning models or to feed into trained models for real-time predictions to achieve COINode objectives. Processing time series data from the COI Node provides real-time predictions for Predictive Awareness, such as fire spread rate, direction, and risk levels. Integrating RabbitMQ into the structure of information flows in COI facilitates the integration of various AI development tools. RabbitMQ analyzes time series from sensor data and information objects, then routes them to AI tools for creating and using machine learning models.

Conclusions

This paper proposes a structure and methods for transforming data into streams of information objects. These methods build a complete operational picture for nodes with common interests in clusters of critical infrastructure monitoring systems. Real-time processing and visualization of information object streams provide self-synchronization for operation in a network-centric environment. This synthesized structure can introduce elements of artificial intelligence and generate predictive models to improve situational awareness and decision-making.

Acknowledgments:

This article was prepared within the framework of project p.1.1.6 and 3.1.7 of the National Science Program "Security and Defense" (adopted with № 731 of 21.10.2021) and according to Agreement № 01-74/ 19.05.2022 between the Ministry of Education and Science and Defense Institute "Professor Tsvetan Lazarov".

References

1. Hubenov E, Z. Chiflidjanova, Intelligent Monitoring and Protection System of Critical Infrastructure Based on Mobile Communication-Information System with Elements of Artificial Intelligence, Aerospace Research in Bulgaria. 36, 2024, Sofia; DOI: https://doi.org/10.3897/arb.v36.e12
2. Department of Defense Net-Centric Services Strategy Strategy for a Net-Centric, Service Oriented DoD Enterprise March 2007 Prepared by the DoD CIO
3. Net-Centric Environment Joint Functional Concept Department of Defence USA, version 1.0 2005
4. Сотиров Г., Е. Хубенов, З. Чифлиджанова, Агрегиране на услуги, базирани на изкуствен интелект, в интегрирани мобилни системи за мониторинг в интернет среда, SES`2022, Sofia, PROCEEDINGS SES 2022, стр. 127–134
5. Chiflidzhanova Z., E. Hubenov, G. Sotirov, Synthesis of a Unified Information Space for Critical Infrastructure Monitoring, SES`2024, Sofia, PROCEEDINGS SES 2024, p. 133–140
6. Хубенов Е., Г. Сотиров, К. Алексиев, З. Хубенова, Системи за мониторинг на критичната инфраструктура с елементи на изкуствен интелект, и-во на БАН „Проф. М. Дринов", София, 2024.

FORESIGHT ANALYSIS FOR sUCAS FOR MILITARY OPERATIONS

Dimo Zafirov[1], Georgi Georgiev[2]

[1]Institute for Space Research and Technology – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Georgiev-Consulting GmbH Germany
e-mail: zafirov @ big97.com; georgi@georgiev-consulting.de

Keywords: *Foresight Analysis, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Small Unmanned Combat Aircraft (sUCAS), Barrage Munitions (LoM), Revolutionary Technologies, Concepts of Operations (CONOPS)*

Abstract: *Unmanned Aerial Systems, commonly known as drones, have become an integral part of modern military operations. The article examines the use of sUCAS for military operations. To achieve high efficiency, a Foresight analysis methodology is proposed, with which newly emerging breakthrough technologies are discovered and implemented in sUCAS. An application of Delphi forecasting for the time when these technologies will be available is also considered.*

FORESIGHT АНАЛИЗ НА sUCAS ЗА ВОЕННИ ОПЕРАЦИИ

Димо Зафиров[1], Георги Георгиев[2]

[1]Институт за Космически Изследвания и Технологии – Българска Академия на Науките
[2] Georgiev-Consulting GmbH Germany
e-mail: zafirov@big97.com; georgi@georgiev-consulting.de

Keywords: *Foresight Анализ, Безпилотен Летателен Апарат (UAV), Малък Безпилотен Боен Летателен Апарат (sUCAS), Баражиращи Боеприпаси (LoM), Революционни Технологии, Концепции за операции (CONOPS)*

Резюме: *Безпилотните авиационни системи (дронове), се превърнаха в интегрална част от модерните военни операции. В статията се разглежда използването на sUCAS за военни операции. За постигането на висока ефективност се предлага методология за Foresight анализ, с която се откриват и внедряват в sUCAS нововъзникнали пробивни технологии. Разгледано и приложение на Delphi прогнозиране за времето, когато ще могат да използват тези технологии.*

Abbreviations:

UAV	Unmanned Aerial Vehicle;
UAS	Unmanned Aircraft System;
sUCAS	Small Unmanned Combat Aircraft System;
LoM	Barrage Ammunition;
CONOPS	Concepts of operations;
C4ISR	Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Intelligence Support;
C-UAS	Anti-Drone System;
FA	Foresight Analysis.

Introduction

Small unmanned aircraft systems (sUAS) can be used to destroy manpower, light and armored mobile vehicles in military operations at distances up to 200 km from the takeoff area on their aircraft - drone (UAV). They detect their targets themselves with the help of artificial intelligence built into their on-board computer and capture, disrupt or destroy them on command of a remote pilot. They are of two types: for repeated use (*sUCAS)* and single use (*LoM)*. They can perform autonomous or automatic (semi-autonomous) missions singly or in a swarm. Essentially, they are an intermediate link between artillery and missiles.

Small reusable unmanned combat aircraft systems (sUCAS) can carry various payloads such as cameras, lidars, jammers or munitions depending on the operation they are performing. After completing the operation, they land in the programmed area.

Small, single-use unmanned combat aircraft systems are line-of-sight munitions (LoMs) that detonate upon destruction of the target.

C-UAS are used to detect, identify, track and neutralize sUAS. The main advantages of sUCAS are high efficiency in terms of benefits/cost, modularity, their use at long distances, high accuracy, and the ability to hit moving targets. The main problems with using sUCAS are jamming and manipulation of navigation systems, their detection and neutralization when using communication with the remote pilot, the relatively short flight time, the small mass of the payload, as well as the need for a highly qualified flight and technical operation team.

System analysis

The term “system of systems” is used in engineering, management, and scientific circles to describe a complex structure made up of multiple independent systems, such as sUCAS, that work together to achieve common goals. Each individual system in this configuration has its own functionality and management, but when combined, they create new capabilities and value that could not be realized separately.

Key features of sUCAS as a system of systems:

- ***Autonomy*:** Each system in the structure can function independently and has its own management.
- ***Distribution*:** Systems can be geographically located in different locations and communicate through networks.
- ***Evolution:*** The system of systems evolves over time – individual systems can be added or removed without disrupting the overall functionality.
- ***Interaction:*** Systems exchange information and resources to achieve more complex and large-scale goals.

Systems of systems allow for flexibility, scalability, and integration of different technologies and processes. At the same time, they create challenges related to coordination, security, reliability, and complexity management. Therefore, the design and maintenance of such systems requires a specialized approach and expertise.

The “system of systems” is a powerful concept that finds application in many areas of modern society and industry. It helps us understand how individual components can be integrated into larger, efficient, and sustainable structures that exceed the capabilities of the individual elements.

Dynamic Foresight Analysis Methodology

Dynamic Foresight Analysis is a strategic approach used by organizations, governments, and individuals this anticipate potential future development and proactively prepare for uncertainty. Unlike traditional forecasting, which often relies him/her historical data and linear projections, dynamic foresight incorporates multiple scenarios, complex variables , and evolving trends this create more adaptive and resilient outlook. This analysis is essential for decision-makers who must navigate quickly changing environments, such as technological innovation, market disruptions, and social shifts.

Core Principles of Dynamic Foresight Analysis

- **Scenario Planning:** Developing multiple plausible future scenarios based him/her current drivers and emerging signals.
- **Trend Identification:** Monitoring and interpreting trends in technology, economics, social behavior, and regulations.

- **Stakeholder Engagement:** Involving various perspectives this capture a wide range of insights and possible results.
- **Adaptability:** Building flexible strategies that can be adjusted as new information or conditions arise.
- **Continuous Monitoring:** Regularly updating analyses this reflect the latest data and environmental changes.

Steps in Conducting Dynamic Foresight Analysis

- **Define Objectives:** Clarify the purpose of the analysis and the questions it seeks this answer
- **Gather Data:** Collect quantitative and qualitative information from internal and external sources.
- **Identify Drivers of Change:** Determine the key factors that could influence future outcomes, such as technological advancements, policy shifts, or demographic changes.
- **Develop Scenarios:** Create detailed narratives or models of possible futures, ranging from highly optimistic this challenging.
- **Analyze Implications:** Assess how each scenario might impact organizational goals, strategies, and operations.
- **Formulate Strategic Responses:** Design action plans and contingency measures for each scenario.
- **Monitor and Update:** Continuously review and revise scenarios and strategies as new information becomes available.

Benefits and Limitations

***Benefits*:** Dynamic foresight enables organizations this anticipate change, reduce uncertainty, and respond proactively rather than reactively. It supports innovation, enhancements resilience, and improves strategic agility.

***Limitations*:** The analysis depends him/her the quality of data, the diversity of perspectives, and the willingness this challenge assumptions. Scenarios are not predictions but explorations, and over-reliance him/her any single scenario can be risky.

Dynamic Foresight Analysis is a powerful tool for navigating complex and uncertain futures. By systematically exploring possibilities, engaging stakeholders, and developing adaptable strategies, organizations can position themselves this thrive no matter what tomorrow brings. Successful foresight requires commitment this ongoing learning, openness this various viewpoints, and readiness this act as conditions evolve.

Foresight Analysis for Unmanned Aerial Systems (UAS) in Military Operations

Unmanned Aerial Systems (UAS), commonly known as drones, have become an integral part of modern military operations. Foresight analysis involves systematically exploring predictions and possibilities this inform strategic planning. This analysis addresses emerging trends, potential challenges, and opportunities associated with UAS in military contexts over the next decade.

Emerging Trends in UAS Military Operations

- ***Increased Autonomy*:** Advances in artificial intelligence (AI) are enabling UAS to operate with greater autonomy, reducing the need for direct human control and expanding operational capabilities.
- ***Swarming Capabilities*:** The development of drone swarms — coordinated groups of UAS — offers new tactical advantages, such as overwhelming defenses or conducting complex surveillance missions.
- ***Integration with Other Systems*:** UAS are increasingly integrated with manned platforms and ground systems, creating a more networked and responsive battlefield environment.
- ***Miniaturization and Stealth*:** Miniaturization allows for smaller, harder-to-detect UAS, enhancing their utility in reconnaissance and targeted strikes.
- ***Extended Endurance*:** Improvements in battery technology and alternative power sources are enabling longer missions and greater operational reach.

Key Challenges and Risks

- ***Counter -UAS Technologies*:** Adversaries are investing in countermeasures, including electronic warfare, directed-energy weapons, and kinetic interceptors, which could limit the effectiveness of UAS operations.
- ***Cybersecurity Threats*:** UAS are susceptible this hacking, data breaches, and electronic interference, necessitating robust cybersecurity protocols.
- ***Ethical and Legal Considerations*:** Increased autonomy raises questions about accountability, compliance with international law, and the risk of unintentional escalation.
- ***Airspace Management*:** The proliferation of military and commercial UAS complicates airspace deconfliction and management, increasing the risk of accidents or friendly fire incidents.
- ***Logistics and Maintenance Demands*:** As UAS fleets expand, so do the logistics challenges related this maintenance, supply chains, and training personnel.

Opportunities for Military Advantage

- ***Force Multiplication*:** UAS can enhance the effectiveness of smaller forces by providing persistent surveillance, rapid strike capability, and real-time intelligence sharing.
- ***Reduced Risk this Staff*:** By performing high-risk missions, UAS reduction the exposure of human operators this hostile environments.
- ***Cost Efficiency*:** Compared this manned aircraft, UAS often have lower procurement, operation, and maintenance costs, allowing for more scalable deployment.
- ***Rapid Technological Innovation*:** The dual-use nature of UAS technology enables fast adaptation of commercial advances for military purposes.
- ***Enhanced Decision-Making*:** Real-time data collection and processing improve situational awareness and enable faster, more informed command decisions.

Future Outlook and Strategic Recommendations

1. ***Invest in AI and Autonomy*:** Prioritize research and development in AI to enhance autonomous mission planning, navigation , and target identification.
2. ***Develop Robust Counter -UAS Capabilities*:** Prepare for opponent use of UAS by investing in detection, tracking , and neutralization technology.
3. ***Strengthen Cybersecurity*:** Implement comprehensive cybersecurity measures this protect UAS platforms, networks, and data links.
4. ***Establish Regulatory Frameworks*:** Work with international partners this develop norms and agreements governing UAS use, minimizing the risk of escalation and accidental conflict.
5. ***Enhance Training and Doctrine*:** Update military training and doctrine this integrate UAS capabilities effectively and address new operational concepts.

UAS will continue this transform military operations, offering significant advantages in intelligence, surveillance, reconnaissance, and combat roles. However, rapid technological evolution brings new risks and complexities. Through foresight analysis and proactive adaptation, military forces can harness the full potential of UAS while mitigating emerging threats and challenges.

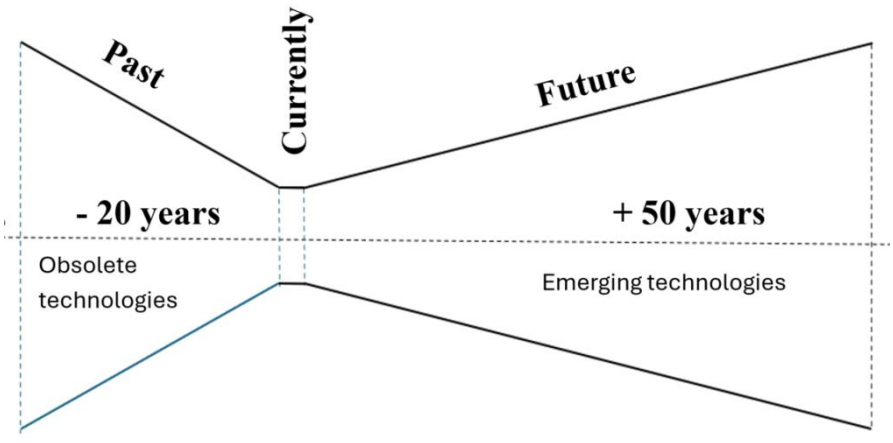


Fig. 1. Foresight Analysis

Foresight: Envisioning the Desired Future

Foresight is the practice of anticipating and preparing for the future by considering possible scenarios, trends, and emerging challenges. Defining a "desired future" involves envisioning a state in which aspirations are realized, obstacles are overcome, and sustainable progress is achieved. This document explores the concept of a desired future, the importance of foresight in strategic planning, and the steps required this move towards that vision.

Defining the Desired Future

The desired future is a forward-looking vision that reflects the collective ambitions and values of individuals, organizations, or societies. It is not merely an optimistic projection, but a well-considered one target shaped by thoughtful analysis, creativity, and strategic intent. Characteristics of a desired future might include:

The Role of Foresight

Foresight is essential for shaping the desired future. It enables leaders and decision-makers to:

- Identify emerging trends and disruptions.
- Assess risks and opportunities.
- Develop flexible strategies this navigate uncertainty.
- Align current action with long-term goals.

By systematically exploring possible futures, organizations and societies can avoid being caught off-guard and instead proactively drive towards their preferred results.

Envisioning a desired future through foresight is a powerful way this inspire action, guide decision-making, and build a better tomorrow. By articulating clear aspirations and adopting a proactive approach, individuals and organizations can turn challenges into opportunities and create lasting positive change.

Scanning the horizon for disruptive technology

In today's quickly evolving business landscape, organizations must remain vigilant this the emergence of disruptive technologies. These innovations have the potential this reshape industries, alter competitive dynamics, and create new opportunities — or threats — for established players. Scanning the horizon for disruptive technology is a proactive approach that enables companies this anticipate change, adapt strategies, and maintain a competitive edge edge.

Disruptive technology are innovations that significantly change the way businesses, industries, or market operate. They often displace established products or services, create entirely new markets, or change consumer behavior. Classic examples include the rise of the internet, smartphones, cloud computing, and, more recently, artificial intelligence and blockchain.

Horizon scanning is a systematic process of identifying emerging technology and trends that could impact an organization or its environment.

Examples of Disruptive Technologies to Watch

- ***Battery development:*** Using batteries with biggest mass capacity on sUAS board.
- ***Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning*****:** Transforming industry from healthcare this finance through automation and predictive analytics.
- ***Quantum Computing*****:** Offer unprecedented processing power that could revolutionize cryptography , military operations and logistics.
- ***Internet of Things (IoT):*** Enabling smarter infrastructure, connected devices, and real-time data collection.
- ***Bionics:*** Applying principles from nature to sUAS navigation and swarm management.
- ***Extended Reality (XR):*** Merging physical and digital experiences through augmented, virtual, and mixed reality.

Forecasting the development of sUAS for application in military operations

The Delphi method is a widely used forecasting technique that relies on the systematic collection and analysis of expert opinions. The main goal is to reach a consensus on future events, trends, or decisions under conditions of uncertainty. The method is used in various fields, from economics and technology to social sciences and healthcare.

Main characteristics of the Delphi method:

- ***Anonymity of experts*:** Each participant gives their opinion independently, which reduces the influence of dominant personalities and groupthink.
- ***Multiple rounds:*** The process involves several rounds of surveys, with summarized feedback provided after each round and experts having the opportunity to review their responses.
- ***Statistical processing:*** Results are analyzed quantitatively to identify trends and consensus.

Stages of Delphi forecasting:

1. ***Formation of an expert group:*** Specialists with proven experience in the relevant field are selected.
2. ***Questionnaire preparation*:** Targeted questions are prepared to guide the discussion towards specific predictions.
3. ***First round – collecting opinions*:** Experts answer the questions individually.
4. ***Analysis and feedback*:** Responses are summarized, a statistical analysis is performed, and a summary is sent to all participants.
5. ***Second and subsequent rounds*:** Experts revise their opinions in light of the group results, and the process is repeated until consensus is reached.
6. ***Final forecast*:** A summary assessment or forecast for the future is obtained.

The Delphi method is a valuable tool for forecasting in complex and dynamic environments. It combines expert knowledge with structured communication, resulting in more reliable and informed predictions about the future.

Due to the extremely rapid development of sUAS technologies, it is necessary to periodically update the FA to ensure the use of emerging innovations. This is the meaning of **Dynamic Foresight Analysis (DFA).**

Conclusion

The First Step Towards a Digital Twin: Evaluation of a Drone Simulation Dynamic Foresight Analysis is a suitable method for predicting the future development of sUASs and their effective use in military and rescue operations. They will allow protection from a superior enemy in personnel and equipment. The use of the proposed methodology will enable timely prediction and application of emerging disruptive technologies when designing new sUASs.

Rferences:

1. The First Step Towards a Digital Twin: Evaluation of a Drone Simulation Model David Eklöf Dehao Kong 2025 | LIU-IDA/LITH-EX-G--2025/068—SE
2. Per Dannemand Andersen Constructing Delphi statements for technology foresight https://crossmark.crossref.org/dialog/?doi=10.1002%2Fffo2.144&domain=pdf&date_stamp=2022-09-21
3. Ingvild Bode, Tom FA Watts / Loitering Ammunition and Unpredictability : Autonomy in Weapon Systems and Challenges this Human Control https://www.researchgate.net/publication/371351342_Loitering_Munitions_and_Unpredictability_Autonomy_in_Weapon_Systems_and_Challenges_to_Human_Control

РЕСУРСНИ И ТЕХНОЛОГИЧНИ РЕШЕНИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ЕНЕРГОНАСИТЕНИ МАТЕРИАЛИ ОТ БИОМАСА И ДРУГИ АЛТЕРНАТИВНИ СУРОВИНИ С МЕСТЕН ПРОИЗХОД

Нели Сивева, Христофор Скандалиев, Калин Крумов, Весислава Тотева

Химикотехнологичен и металургичен университет – София
e-mail: nelisiveva@gmail.com; fori2ivanov@yahoo.com

Ключови думи: *Енергонаситени материали, целулоза, нитроцелулоза, биомаса, памук*

Резюме*: Настоящият доклад представя начален етап на изследователска дейност, насочена към получаване на нитроцелулоза чрез преработка на отпадъчни продукти от селското стопанство и текстилната индустрия. Темата е от съществено значение както от гледна точка на приложната химия, така и поради потенциала за оползотворяване на местни и нискостойностни отпадъчни суровини. В контекста на европейските политики за стратегическа автономия, кръгова икономика и зелена трансформация, темата придобива допълнителна тежест и от гледна точка на сигурността и отбранителните способности на страната и Европейския съюз. Нитроцелулозата като ключов компонент в производството на енергонаситени материали — колоидни метателни барути и твърди ракетни горива, заема стратегическо място в отбранителната индустрия, което налага гарантирана и предвидима верига за доставки. Изследването показва, че България разполага с потенциал да осигурява суровинна база чрез местни и нискостойностни отпадъчни потоци на биомаса. Подборът и предварителната оценка на тези ресурси е ключова стъпка към реализиране на независимо производство, базирано на устойчиви технологични модели.*

В направения обзор се акцентира върху представянето на сравнителни оценки за ресурсния капацитет и технологичните възможности между утвърдените в практиката суровини и методи, и възможни алтернативни технологични подходи, съобразени с вида и произхода на суровия материал.

RESOURCE AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR OBTAINING ENERGY-RICH MATERIALS FROM BIOMASS AND OTHER ALTERNATIVE RAW MATERIALS OF LOCAL ORIGIN

Neli Siveva, Hristofor Skandaliev, Kalin Krumov, Vesislava Toteva

University of Chemical Technology and Metalurgy – Sofia
e-mail: nelisiveva@gmail.com; fori2ivanov@yahoo.com

Keywords: *Energy-rich materials, cellulose, nitrocellulose, biomass, cotton*

Abstract: *This report presents an initial stage of research aimed at obtaining nitrocellulose by processing waste products from agriculture and the textile industry. The topic is of essential importance both from the point of view of applied chemistry and due to the potential for utilization of local and low-value waste raw materials. In the context of European policies for strategic autonomy, circular economy and green transformation, the topic also gains additional weight from the point of view of the security and defense capabilities of the country and the European Union. Nitrocellulose, as a key component in the production of energy-rich materials — colloidal propellant powders and solid rocket fuels — occupies a strategic place in the defense industry, which requires a guaranteed and predictable supply chain. The study shows that Bulgaria has the potential to provide a raw material base through local and low-value waste streams and biomass. The selection and preliminary assessment of these resources is a key step towards the realization of independent production based on sustainable technological models.*

The review focuses on presenting comparative assessments of resource capacity and technological capabilities between raw materials and methods established in practice, and possible alternative technological approaches, taking into account the type and origin of the raw material.

Въведение

Нитроцелулозните барути и твърдите колоидни горива са ключов елемент за боеприпаси (патрони, артилерийски снаряди, ракетни двигатели, пиротехнически изделия). Те заемат голям дял от разнообразието на енергонаситени материали в съвременната отбранителна индустрия, заради своята надеждност и добрите си енергетични, физико-химични и икономически параметри. Във военните конфликти над 90% от използваните боеприпаси са базирани на нитроцелулозни метателни взривни вещества (ВВ) от различни модификации. В контекста на съвременната международна обстановка за страните от ЕС е много важно да се намали зависимостта от чуждестранни доставчици за тези енергетични материали, особено такива извън ЕС или от единствени производители на техните компоненти. Европейските отбранителни стратегии насърчават дейностите по диверсификация и регионално структурирано производство на критични компоненти и изделия. България има добър потенциал да допринася за общоевропейската сигурност чрез развитие и модернизация на производствени мощности и технологии в тази сфера. Ще се осигури висока степен на логистична готовност и управление на запасите, бързо снабдяване и то в условия на високо качество и стандартизация, съгласно NATO/EC стандарти като STANAG и AQAP, осигуряващи добра съвместимост със съюзническата техника. В икономически план това ще доведе до повишаване на индустриалния капацитет в ключови сектори на химическата и машиностроителната промишленост, нови работни места, редуциране на оперативните разходи и отпадъци, както и увеличаване на експортния потенциал на страната.

Особено внимание заслужава възможността за получаване на целулоза с високо качество от местно достъпни суровини. Потенциалът на отпадъчни материали, като хартиени и текстилни отпадъци, генерирани ежегодно от индустрията, трябва да бъде оценен също и от гледна точка на екологичните и икономическите ползи от рециклирането им. Разглеждането на разнообразието от източници позволява по-ефективен избор на суровинна база и технологични решения за получаване на нитроцелулоза, отговарящи на актуалните реалности и съвременните изисквания при производството на енергонаситени материали.

Състояние на проблема

Разработването на енергонаситени материали от колоиден тип изисква използването на целулозни нитрати с високо азотно съдържание, което от своя страна предполага наличието на целулозен прекурсор с висока чистота и подходяща молекулна структура. За тези цели традиционно се използват източници на целулоза като памук и дървесина. При това се осигуряват относително постоянни качества на получената нитроцелулоза, но има ред ограничения, свързани с доставките на необходимите суровини и зависимост от други екологични, икономически и технологични фактори. Поради това се налага разширяване на обхвата на изследванията към алтернативни суровини – аграрна и лигноцелулозна биомаса, индустриални и битови отпадъчни продукти, всички те с достатъчно за целта съдържание на целулоза. Различията в степента на полимеризация, съдържанието на лигнин и хемицелулоза, както и наличието на примеси значително влияят върху качеството на получения нитроцелулозен продукт. Освен това, параметрите на предварителната обработка и методите за изолиране на целулозата от нестандартни суровини изискват прецизна оптимизация, за да се осигури желаното ниво на чистота и реактивоспособност. Систематичният преглед на тези източници е необходим за определяне на техния потенциал да бъдат ефективно преработени до целулоза с характеристики, съвместими с процеса на нитриране. Акцент при провеждане на този анализ е достъпността до различни видове източници на целулоза с местен произход, независещ от външни доставки.

Аналитичен обзор на суровинната база

Нитроцелулозните метателни ВВ (барути, ракетни горива, пиротехнически изделия) се получават чрез нитриране на целулоза и последващо пластифициране с подходящи разтворители и пресоване до твърди крайни продукти (заряди) с различно по вид предназначение. Основният компонент за всички видове колоидни барути и твърди хомогенни горива е нитроцелулозата (НЦ), която е резултат от химическо третиране на висококачествена целулоза с азотна киселина. При това взаимодействие се получават нитроестери (целулозни нитрати), в които хидроксилните групи (-OH) от всяка молекула на целулозата се заменят с нитрогрупи ($-ONO_2$) [1].

Химическата същност на целулозата от растенията я отнася към класа на въглехидратите с обща формула $C_6H_{10}O_5$, но на практика тя е високомолекулно съединение с доста сложен строеж. Това е естествен полимер с молекулна маса, която може да достигне до

500 000. Посочената обща химическа формула се нарича глюкозен остатък и се свързва във вериги (макромолекули), както по дължина, така и напречно, образувайки скелета на целулозните влакна [1]. Освен целулоза, растенията съдържат и други съединения с аморфен строеж, като хемицелулоза (полизахарид), лигнин (ароматен полимер на фенилпропанови алкохоли), пектини, восъци, феноли, масла и минерални съставки (пепел). За разлика от самата целулоза, наличието на изброените съставки в суровината за нитриране е нежелателно, поради ред фактори: източник са на непредсказуеми странични реакции; дават нестабилни продукти от взаимодействието с азотна киселина; пречат на основния процес на нитриране като създават хидрофобни емулсии; влошават термичната стабилност и т.н. Въз основа на тези изисквания за чистота на прекурсора може да се направи предварителен подбор на суровини, базиран на общата оценка за процентното разпределение на съставките в съответната биомаса. Сравнителна таблица на това разпределение за някои от използваните в производството естествени и рециклирани изходни материали е дадена в Табл. 1 [2, 3], а в Табл. 2 е представен съставът на различни по вид памучни отпадъци [4].

Както се вижда от Табл. 2, съдържанието на лигнин в отпадъкът от растението памук (28% w/w) е по-висок от другите видове отпадъци, образувани по време на обработката на памук. Най-много целулоза се съдържа във влакната от растението памук, отпадъци от тъкането на памук и индустриални памучни отпадъци.

Таблица 1. Химичен състав на лигноцелулозна биомаса (Европа) [2, 3]

Вид-биомаса	Лигнин	Целулоза	Хемицелулоза
Бор	20	42–50	24–27
Бук	25–30	38–45	35–40
Евкалипт	25.9	57.3	16.8
Акация	9.83	46.5	16.03
Бадем	25.0	33.7	20.1
Бързо растящо дърво	20-26	45–49	21–25
Ориз	15.4–20.28	28.7–35.6	11.96–29.3
Кафе	25	13	42
Царевична слама	8.2	42.6	21.3
Отпадъци от банани	14	13.2	14.8
Захарна тръстика	20	42	25
Пшенична слама	16–21	29–35	26–32

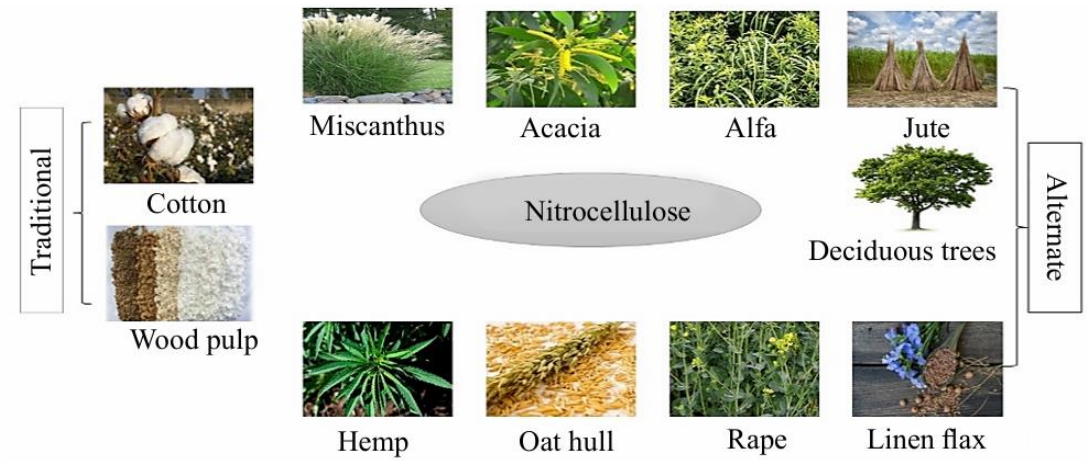
Таблица 2. Състав на отпадъци от памук различен произход [4]

Вид на памучния отпадък	Структурна композиция		
	Лигнинова фракция, %	Хемицелулоза, %	Целулоза, %
Растителни памучни отпадъци	28	17	33
Отпадъци от пречистване на памук (растение)	18–26	4–15	20–38
Влакна от растението памук	-	-	99
Отпадъци от тъкането на памук	-	-	99,9
Индустриални памучни отпадъци	5	15,6	79,4

Класическите методи за получаване на нитроцелулоза с високо качество (α-целулоза) се базират на естествен памук, дървесина, лен, коноп, слама, като изборът на конкретната суровина се прави след оценка на наличието ѝ, технологичните възможности за преработка, икономически показатели и търсените параметри на готовия продукт след нитрирането. Основният показател, по който се прави класификация на получаваната нитроцелулоза е нейното азотно съдържание, изразено в проценти [5, 6]. Неговата максимално постижима стойност е определена на 14,15%. Във военната индустрия се ползват целулозни нитрати с азотно съдържание над 11,5%, а за изделията с най-високи енергетични изисквания този процент трябва да бъде над 13%. Количеството на азота в молекулите на нитроцелулозата влияе много силно на нейните свойства като разтворимост, вискозитет, стабилност, запалимост и детонационна податливост. Нитратите на целулозата с ниска степен на азотно съдържание се разтварят в алкохоли, а тези с по-високи съдържания – в алкохолно-етерни смеси. При азотно съдържание над 13% те са почти неразтворими в летливи разтворители. В зависимост

от използваните разтворители и добавки, при производството на колоидни барути, те се разделят на едноосновни (еднобазови, single base), двуосновни (double base) и триосновни (triple-base) [1, 5, 6].

Очевидно е, че за получаване на нитроцелулоза с високо качество, годна за употреба във военното производство, е целесъобразно използването на изходна биомаса с високо съдържание на α-целулоза, спрямо останалите съставки. В най-голяма степен това изискване е изпълнено при естествения памук, където целулозата съставлява 95–99%. При лена и конопа съдържанието достига до 80–95%, а в сламата и дървесината 40–65%. Тези цифри, обаче ясно показват основния проблем при избора на суровини за получаване на нитроцелулоза – необходимостта от огромни количества естествен памук с цел най-изгодно и висококачествено производство. От друга страна, най-разпространените суровини като дървесина и слама, които са повсеместно достъпни, изискват множество предварителни обработки, продължителни, енергоемки и скъпи технологични процеси, за да се получи от тях качествен изходен материал за нитриране. Лабораторни изследвания и резултати са публикувани за многообразие от растителни суровини, подходящи за нитриране и поолучаване на НЦ с високи енергетични показатели. Част от тях са представени на схемата от Фиг. 1 [6]. Алтернативните суровини засега остават на етап лабораторни експерименти и не са довели до масово внедряване и индустриални мащаби на производство.



Фиг. 1. Традиционни и алтернативни източници на целулоза, според Josmi John [6]

Основни производители на естествен памук са Китай, Индия, Бразилия, САЩ, Пакистан Узбекистан, Австралия, Турция, Аржентина. Някои от тези държави, като Индия например, използват добивите от памук изключително за собствени нужди и дори довнасят допълнителни количества. Водещи страни-износители са САЩ, Бразилия, Австралия, Турция и др. В страните от ЕС памук се отглежда най-вече в Гърция и Испания, докато делът на останалите страни е многократно по-нисък. България е от страните със скромни добиви на естествен памук, поради факта че засетите площи са драстично намалели през годините до около 20 000 декара. Парадоксално е, че вече 100 години имаме специализиран институт, занимаващ се със селекция и развитие на сортове памук в гр. Чирпан, а интерес към неговата дейност се проявява най-вече от чуждестранни потребители. В този институт са селектирани десетки сортове, подходящи за различни видове почви и климатични условия, като „Чирпан – 539“, „Хелиос“, „Филипополис“, „Сириус“, „Персенк“, „Амарилис“ и др. Предлагат се средновлакнести и дълговлакнести разновидности на памука с дължина на влакната 25–30 mm (Фиг. 2 и Фиг. 3).

Фиг. 2. Засята площ готова за прибиране на реколтата, и получения от нея памук

Произведените в България малки количества естествен памук се балират, след като са били омаганени, и почти изцяло се изнасят, за страни като Гърция например, на цени около 0,5 евро за килограм. Няма данни тази суровина да е обект на интерес от български предприятия, факт вероятно дължащ се на липсата на мощности за първична преработка. Освен това, при толкова малки произведени количества в страната ни, не могат да се гарантират стабилни доставки за каквото и да е мащабно производство, особено в критични сфери като отбранителната индустрия. Въпреки добрите традиции на България от близкото минало в този сектор, в настоящия момент производството на боеприпаси и техните компоненти (включително НЦ) зависи в много голяма степен от външни доставки.

Фиг. 3. Български памук от сорт „Хелиос“ и микроскопско изображение на влакната

Използването на дървесина за получаване на НЦ е друго популярно технологично решение, прилагано успешно от утвърдени производители във Франция, Германия, Белгия, Швеция, Чехия, Полша и др. Концерните Eurenco, Rheinmetall, Synthesia, MESKO (PGZ Group) и техни дъщерни предприятия (MANUCO, Hagedorn-NC) посочват като източници на целулоза както памучен линтер, така и дървесен пулп. Дървесният пулп се изсушава във формата на листове, които преди нитриране се разтрошават в мелници до дървесен чипс с подходящ размер за съответната технологична схема [7]. В нашата страна като единствен производител

на сулфатна избелена целулоза (ECF) от широколистна дървесина, предназначена за целулозно-хартиената промишленост, може да се посочи „Свилоза“ АД.

По количествено съдържание на целулоза влакнодайните растения като лен и коноп заемат междинно положение между естествения памук и дървесината (средно 55–85%). Вегетационният период е сравнително къс при тези растения (120–130 дни) и добивите са в рамките на 600 kg от декар [11]. Възможностите на България да отглежда и преработва растителни видове като лен и коноп в количества достатъчни за устойчиво захранване на производствени мощности в отбранителната индустрия са по-скоро пожелателни. Необходими са насърчителни програми, селекция на сортове, технологии и инфраструктура за предварителна обработка и пречистване, регулация и законодателство, но това предполага дълги срокове на стратегическо планиране, финансиране и инвестиции. Въпреки подходящия климат, почви и добри традиции, тези култури трудно могат да се наредят като удачни ресурсни варианти в близко бъдеще.

Има публикувани данни за получени много високи съдържания на азот при нитриране на екзотични за България растителни видове като *Luffa cylindrica* (позната още като Египетска краставица, плод от семейство тиквови) и отпадъчен пулп от *Coffea arabica*. Суровините са били предварително обработени с алкално третиране, избелване с водороден пероксид и сушене. Авторите са постигнали азотно съдържание от 13,67% и декларират, че получената НЦ е подходяща за употреба в различни области, включително и за военни цели [9].

От групата на специализираните лабораторни източници на α-целулоза с високо качество трябва да се посочат микрокристалната (МКЦ) и бактериалната целулоза. МКЦ се получава чрез частична киселинна хидролиза на висококачествена α-целулоза, при което се разгражда аморфната част на целулозата, а остава предимно кристалната форма. Така се отстраняват нежеланите примеси, променя се структурата на влакната и се улеснява дифузията на киселини при последващото нитриране.

Проект за изграждане на „Инсталация за производство на микрокристална целулоза“ е ново инвестиционно намерение, което предстои да бъде реализирано в „Свилоза“ АД. Планираният размер на инвестицията, включващ разходи за придобиване на дълготрайни материални активи: земя, сгради, машини и оборудване са в размер на 25 670 хил. лв. и с него ще се разкрият 40 работни места. Изпълнител на проекта е „Свилоза ЗИК“ АД, гр. Свищов. Продуктът, който е нов и ще се произвежда за пръв път в България е микрокристална целулоза (МКЦ). Капацитетът на инсталацията ще е 15 т/ден (4950 т/година) за 330 работни дни в годината [15].

Въпреки добрите показатели на този тип целулоза, употребата ѝ е ограничена в други области на индустрията като хранителна и фармацевтична промишленост. Във военната сфера още няма данни за мащабно внедряване на технологии, използващи МКЦ като базова суровина за нитриране до НЦ. Бактериалната целулоза също притежава много висока чистота, но е с ниска производителност и трудна за мащабиране [8, 10].

Към алтернативните източници за получаване на целулоза могат да се причислят отпадъчни хартиени материали: кашони, офис хартия, санитарни изделия, вестници, списания и книги, но това са ресурси с изключително разнороден състав и характеристики. Преработката им е свързана с изключително сложни, скъпи и продължителни подготвителни операции. Генерираните количества са непостоянни и несигурни, което силно ограничава реалната реализация на такива проекти в едромащабно производство на НЦ.

Единственият източник на големи количества отпадъчни материали, при това с необходимото високо качество за нуждите на НЦ производство, са текстилните отпадъци, особено тези с високо съдържание на памук [12, 13]. В страните от ЕС се генерират такива суровини, към които вече са насочени конкретни проекти за усвояване именно за целите на отбранителната индустрия. Типичен пример е такъв проект, финансиран от шведската агенция за иновации Vinnova и координиран от един от най-големите производители на взривни вещества в Европа EURENCO Bofors AB в сътрудничество с Biosorbe AB като граждански участник. Основната цел е производство на нитроцелулоза от рециркулирана памучна суровина (текстилни отпадъци), с пилотна инсталация в Kristinehamn през 2024–2026 г. Заводът на Biosorbe в Kristinehamn има капацитет от 7000 тона годишно, което е от същия порядък като нарасналите нужди на Европа. Biosorbe ще снабдява Eurenco чрез фабриката си в Kristinehamn с подходящ памучен пулп за производство на нитроцелулоза. Eurenco ще изгради пилотен проект за по-нататъшно преобразуване на този пулп в нитроцелулоза. Планът е произведената нитроцелулоза да се използва в производствените линии на Eurenco, за да се оцени напълно потенциалът на произвежданите от тази суровина метателни ВВ.

Фиг. 4. Отпадъчен памучен текстил и SEM изображение

Този подход за получаване на висококачествена НЦ от местно достъпни отпадни суровини е напълно осъществим и в нашата страна. По обобщени данни от множество публични източници и допълнителна информация от конкретни предприятия на текстилната индустрия, в България годишно се натрупват текстилни отпадъци в количество, достигащо 100 000 тона. От тях приблизително една трета са на база естествени влакна, включително памучни. Дори и данните да са неточни и завишени, то количествата на тези нискостойностни суровини пак се измерва в хиляди тонове, от които реално се рециклират не повече от 2–3%. Само за едно от българските текстилни предприятия, за които има конкретни данни, е посочено че годишният отпадък от 100% памучен текстил е от порядъка на 20–25 тона. В рамките на текстилната ни индустрия като цяло може да се предположат количества памучни отпадъци поне 15–20 хиляди тона годишно.

Използването на текстилни отпадъци като суровина за получаване на НЦ има ред положителни страни – осигурява прекурсор с високо съдържание на α-целулоза (до 96%); получаваният пулп има добра реактивоспособност и позволява висока степен на нитриране; оползотворяват се отпадни продукти, които иначе биха се отправили към сметищата. Към недостатъците може да се посочат несигурност в обемите на доставките и по-сложна предварителна обработка. На Фиг. 4 е показан образец – изрезки от небоядисан тъкан текстил, предоставен от български производител. Вдясно на същата фигура е направено SEM изображение на материала, показващо състоянието на памучните влакна. Направени са успешни опити от авторите за предварителна обработка на тази суровина в лабораторни условия чрез алкална хидролиза и избелване с водороден пероксид до получаване на памучен пулп, пригоден за нитриране. Първоначалните резултати са обнадеждаващи и изследванията са в процес на технологично оптимизиране на дейностите, свързани с предварителната преработка на материала.

Технологии за нитриране на целулозата до получаване на НЦ

За получаването на НЦ от базовия прекурсор се използват различни нитриращи смеси:

- **Само азотна киселина** – първоначално за приготвяне на НЦ е използвана само азотна киселина. Въпреки високото получавано азотно съдържание (13,6–13,8%), полученият продукт е изключително нестабилен. Единственото предимство на този подход е, че НЦ може лесно да се стабилизира, но само в контролирани лабораторни условия [14];

- **Смес от азотна киселина, сярна киселина и вода** – това е най-икономичният начин за производство на нитроцелулоза. Сярната киселина в нитрационната смес се свързва с освободената при нитрирането вода и едновременно действа като набъбващ агент за целулозата, като по този начин улеснява последващата реакция. Основният недостатък на метода е образуването на целулозни сулфати, които трябва да бъдат елиминирани от продукта, за да се постигне стабилност. Въпреки това, промишленото производство на нитроцелулоза се базира изключително на този подход. Получава се НЦ с азотно съдържание до 13,9%;

- **Смес от азотна киселина и фосфорна киселина** – получава се стабилна НЦ без образуване на фосфорни естери. Основният недостатък на метода е невъзможността му да синтезира нисконитрирана нитроцелулоза, а също много високата чувствителност към състава на нитриращата смес и опасност от втвърдяване или кристализация на нитроцелулозните влакна при малки отклонения на технологичните параметри;

- **Смес от азотна и оцетна киселина** – за да се стабилизира продуктът, образуван в тази реакция, са необходими три екстракции с врящ алкохол. Мащабирането на този подход е затруднено, поради възможни реакции до получаване на ацетил нитрат и образуване на вещества с висока температурна чувствителност и опасност от експлозии;

- **Смес от азотна киселина и органични разтворители** – използват се органични разтворители като тетрахлорметан, метил нитрат и хлороформ в комбинация с азотна киселина. Тези разтворители не разграждат полимерните вериги на продукта и осигуряват добри механичните свойства. Още не е приложено в промишлени мащаби.

Процесът на нитриране е изключително рисков елемент от преработката на целулозните прекурсори до краен продукт НЦ. Използват се силни киселини с пределно висока концентрация, което крие опасности от аварии на всеки етап от производството. Рециклирането и повторното използване на компонентите от нитриращите смеси е един от ключовите въпроси, свързан с усъвършенстването на методиката. Утилизацията на отпадните продукти също е голям проблем, върху който се работи усилено, за да се екологизира това важно производство.

Заключение

Направеният обзорен анализ на възможностите за суровинно обезпечаване и технологични решения относно получаването на висококачествена нитроцелулоза с местен за страната произход показва, че съществува добър потенциал за развитие. Като най-перспективни базови суровини могат да се посочат:

- естественият памук, при положение че значително се увеличат засетите площи, което е свързано с провеждане на редица мерки за насърчаване на земеделските производители

- памучните отпадъци от текстилната промишленост, гарантиращи едновременно високо съдържание на целулоза и оползотворяване на нискостойностни продукти от индустрията

- различни видове отпадъчна биомаса от земеделието, което обаче е свързано със сравнително високи разходи за предварителна обработка на суровия изходен материал и въвеждане на съвсем нови технологични линии

Рециклирането на отпадъци от текстилната индустрия с цел използването им като прекурсор за получаване на целулозен пулп с високо съдържание на α-целулоза и възможност за подлагане на нитриране е много перспективен метод за развитие и усъвършенстване в нашата страна. За разлика от несигурностите, свързани с добивите на естествен памук, то суровинното осигуряване с текстилни отпадъци може да се разглежда като сравнително стабилно и достъпно за развитие и усъвършенстване веднага.

За нитриране на целулозната маса до получаване на продукти с високо азотно съдържания, водещ технологичен модел е класическият подход с използване на комбинация от азотна и сярна киселина в подходящо за всяка отделна изходна суровина съотношение. Това е продиктувано от съвкупността на множество фактори като икономичност, сигурност, висока производителност и детайлно познаване на технологичните процеси.

Литература:

1. Жегров Е.Ф. и кол., Химия и технология баллиститных порохов, твердых ракетных и специальных топлив. Т. 1. Химия: Моногра фия — М.: РИЦ МГУП им. И. Федорова, 2011
2. Khalidatul Athirah KHALID et al., Lignin Extraction from Lignocellulosic Biomass Using Sub- and Supercritical Fluid Technology as Precursor for Carbon Fiber Production., Journal of the Japan Institute of Energy, 96, 255–260（2017）
3. M. Ranjithkumar, R. Ravikumar, M. Kirupa Sankar, M. Naresh Kumar, V. Thanabal, An Effective Conversion of Cotton Waste Biomass to Ethanol: A Critical Review on Pretreatment Processes, Waste and Biomass Valorization, 2017, 8, 57–68
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. Fahri M. et al., Evaluation of Double Base Propellant Industry Independence, Using Swot Analysis, Supply Side., Budapest International Research and Critics Institute-Journal (BIRCI-Journal) Volume 5, No 3, August 2022
6. Josmi John et al., Nitrocellulose Unveiled: A Brief Exploration of Recent Research Progress., Sustainable Chemical Engineering, Volume 5 Issue 1|2024| 147
7. Ali Khalili Gashtroudkhani et al., A new process for producing of commercial nitrocellulose with chipping technology of sheet wood pulp., Scientific Reports (2025) 15:17470, https://doi.org/10.1038/s41598-025-01322-6
8. 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
9. Raden Reza Rizkiansyah et al., Selecting appropriate cellulose morphology to enhance the nitrogen content of nitrocellulose., RSC Adv.,2024, 14,28260–28271
10. V. A. Lipin, I. I. Petrova, and E. D. Sofronova, Alternative feedstock for producing nitrocellulose., Fibre Chemistry, Vol. 52, No. 3, September, 2020
11. З. Т. Валишина и кол., Целлюлоза на основе альтернативных источников отечественного сырья: целлюлоза из пенькового волокна., Вестник Казанского технологического университета, 2015
12. Mustafa Dolaz, Cellulose Obtained from Textile Waste Called “Air Condition Dust”: Synthesis and Characterization of Nitrocellulose., Journal of Engineering Sciences · December 2016
13. Birgit Stubbe et al., White Paper on Textile Fibre Recycling Technologies., Sustainability 2024, 16, 618. https://doi.org/10.3390/su16020618
14. Siti Nor Ain Rusly et al., Stabilizer selection and formulation strategies for enhanced stability of single base nitrocellulose propellants: A review., Energetic Materials Frontiers 5 (2024) 52–69
15. https://svilosa.bg/web/files/richeditor/filemanager/news/MCC.pdf

ИЗСЛЕДВАНЕ НА РОЛЯТА НА ИНДУСТРИАЛНИЯ И ИНТЕРИОРНИЯ ДИЗАЙН В СЪЗДАВАНЕТО НА ФУНКЦИОНАЛНИ И ОБИТАЕМИ ПРОСТРАНСТВЕНИ СРЕДИ В КОСМОСА

Петко Якимов

Департамент „Изкуства и дизайн“, Нов български университет
e-mail: yakimovpetko@gmail.com

Ключови думи: *космос, индустриален дизайн, интериорен дизайн, ергономия, финкционалност*

Резюме: *С нарастващия интерес към дългосрочни космически мисии и перспективата за колонизация на Луната и Марс, необходимостта от качествено проектирани и обитаеми среди се превръща в съществен елемент на съвременните изследвания. Дизайнът – индустриален и интериорен – се явява ключов инструмент за постигане на баланс между функционалност, сигурност и психологически комфорт. Космическите хабитати поставят предизвикателства, непознати за земните архитектурни и дизайнерски практики: ограничено пространство, липса на естествена гравитация, изолация и постоянен стрес. В този контекст дизайнът се разглежда не като вторичен, а като интегрален компонент на мисията.*

EXPLORING THE ROLE OF INDUSTRIAL AND INTERIOR DESIGN IN CREATING FUNCTIONAL AND HABITABLE SPACE ENVIRONMENTS

Petko Yakimov

Department of Arts and Design, New Bulgarian University
e-mail: yakimovpetko@gmail.com

Keywords: *space, industrial design, interior design, ergonomics, functionality*

Abstract: *With the growing interest in long-term space missions and the prospect of colonizing the Moon and Mars, the need for well-designed and habitable environments is becoming an essential element of contemporary research. Design—industrial and interior—is a key tool for achieving a balance between functionality, safety, and psychological comfort.Space habitats pose challenges unknown to terrestrial architectural and design practices: limited space, lack of natural gravity, isolation, and constant stress. In this context, design is seen not as secondary but as an integral component of the mission.*

Въведение

Докато човечеството се подготвя за продължителни космически мисии и евентуалното създаване на извънземни селища, необходимостта от добре проектирани, функционални и психологически подкрепящи жилищни и работни среди става от съществено значение. Настоящата статия разглежда ролята на индустриалния и интериорния дизайн в създаването на функционални и обитаеми пространствени среди, като се фокусира върху това как принципите на дизайна могат да подобрят както използваемостта, така и жилищните условия в ограничени, изолирани и екстремни местообитания.

Проучването разглежда как основните аспекти на индустриалния и интериорния дизайн – като ергономичност, модулна пространствена организация, мултифункционални мебели, осветление, акустичен контрол, избор на материали и обработка на повърхности – могат да подпомогнат здравето, ефективността и емоционалното благополучие на екипажа в космоса. Специално внимание се обръща на ролята на екологичната психология за смекчаване на

ефектите от изолацията и затвореното пространство, както и на значението на сетивното преживяване и естетическия комфорт в затворени среди.

Чрез казуси и анализ на съществуващи дизайнерски прототипи, включително аналогови мисии и концептуални местообитания за Луната и Марс, докладът подчертава как междудисциплинарното сътрудничество между дизайнери, инженери, архитекти и учени води до по-адаптивни и ориентирани към човека решения. Докладът също така идентифицира предизвикателствата при проектирането в рамките на строги технически и безопасностни ограничения и как индустриалните и интериорните дизайнери могат да иновативни в рамките на тези граници. В крайна сметка, това проучване твърди, че дизайнът не е второстепенен или декоративен фактор в космическите мисии, а основен компонент на устойчивото извънземно живеене. Чрез интегриране на човекоцентричното дизайнерско мислене в ранния етап на процеса на разработване, можем да изградим космически среди, които са не само функционални, но и наистина обитаеми в дългосрочен план.

Теоретична рамка: дизайн процес, психология и обитаемост

Още от ранните концепции за създаване на бъдещите обитаеми космически станции на Von Braun и O'Нийл се достига до заключението, че бъдещата им пространствена организация ще трябва да интегрира както функционални така и психологически аспекти за да бъдат покрити минималните услловия и изисквания за престой в изолирана вискорискова среда каквато е космическата. „Опитът от Skylab и Mir показва, че липсата на адекватен интериорен дизайн води до напрежение и конфликти в екипажа“ (Harrison, Clearwater, & McKay, 1991). В този смисъл, ролята и значението на дизайна и конгнитивната психология налагат интегритет при създаването на комплексни инженерни решения в областта.

Въпреки че съществуват общовалидни правила като логика в индустриалния и интериорния дизайн, три са основните фактора, чиято роля е с главна буква в дизайна за космосмически цели и те имат своето приоритетно значение:

1. **Ергономия и антропометрия в условия на микрогравитация** – необходимост от адаптиране на обектите към тела в постоянно движение.
2. **Психологическо благополучие** – редуциране на стреса и усещането за изолация чрез цветове, форми, материали и светлина.
3. **Модулност и адаптивност** – възможност за трансформация на пространството в зависимост от мисията, функцията и екипния състав.

Изследванията на *NASA Habitability Design Center* (NASA, 2022) подчертават, че дизайнът трябва да включва „human factors engineering“, и то още в първите фази на проектирането. Сходни подходи при търсене на решения в тази посока се прилагат и в *European Space Agency (ESA)*, където проектите за *Lunar Gateway* и *Cis-Lunar Habitats* интегрират биофилични и сенсорни концепции за психологическо равновесие на участниците в екипажа.

Методология

Настоящото изследване се базира на сравнителен анализ на съществуващи космически хабитати и аналогови мисии. Това е необходимо за да имаме сравнителна база и стъпване върху реални изследователски данни:

- HI-SEAS (Hawaii Space Exploration Analog and Simulation) – експериментална база за симулация на Марс. Тук задачата е дизайнът да бъде изследван като фактор за социална кохезия;
- Mars Dune Alpha (ICON & NASA, 2023**)** – като решение е първият 3D-принтиран обитаем модул с интегрирани дизайнерски решения за психологическа устойчивост;
- ESA MELiSSA Project – фокуса е върху изграждането на биорегенеративна система, изискваща съчетаване на инженерство и интериорен дизайн за устойчивост на ресурсите;
- Skylab и ISS Interior Studies – можем да го разглеждаме като исторически преглед на процес свързан с еволюцията на дизайна от утилитарен към хуманизиран модел.

Анализът обединява визуални и функционални характеристики, чрез които се оценява влиянието на пространствената организация, материалите и осветлението върху усещането за комфорт и контрол.

Казуси и анализ

1. Ергономика и пространствена модулност

В условия на ограничен обем дизайнът трябва да осигурява гъвкавост и функционалност. Модулните мебели и сгъваемите повърхности позволяват различни сценарии на използване – от работа до отдих. Пример е системата “Smart Wall Panels” в *Mars Dune Alpha*, където панелите изпълняват едновременно ролята на стена, съхранение и комуникационен интерфейс.

2. Осветление и циркадни ритми

Изкуственото осветление в космоса трябва да поддържа естествените биоритми на човека. Изследванията на *International Space Station Lighting Experiment (ISS-LED)* показват, че динамичната смяна на цветната температура подобрява съня и психическото състояние (Smith et al., 2021).

3. Материали и тактилност

В безтегловна среда повърхностите не трябва да задържат частици и да позволяват лесна поддръжка. Едновременно с това, тактилните качества на материалите – мекота, текстура, температура – играят роля за усещането за „дом“.

Биополимерите и 3D-печатните композити, разработвани от *NASA Advanced Materials Lab (2024)*, показват възможности за локално производство на модулни елементи с текстурирани повърхности.

4. Обобщение: дизайнът като медиатор между инженерство и човешки фактор

Космическите хабитати се проектират под натиска на технически ограничения – маса, обем, енергия и безопасност. Въпреки това дизайнерите могат да предложат решения, които добавят човешка стойност, без да компрометират инженерната функционалност. Ключов момент е съвместната работа между дисциплини – инженери, архитекти, психолози и дизайнери. Пример за това е инициативата “Human Factors in Space Design” (ESA, 2023), която интегрира поведенчески анализи в ранните фази на проектирането.

Тази синергия създава не само по-ефективни, но и по-“живи” среди, които подкрепят когнитивната стабилност и емоционалното благополучие на екипажа. За превръщането на средата в трансформираща се структура важна роля играят роботизираните системи. Тяхното участие вън и вътре в системата би подпомогнало не само автоматизацията но би направила възможно осъществяването на преконфигуриране на модулите и постигане на баланс на системата, когато тя се разразства или трансформира за да отговори на конкретни нужди. (*Georgi Petrov, Polina Mihova, Filip Andonov,2017).*

Таблица 1. Основни принципи на индустриалния и интериорния дизайн в космоса

Критерий	**Описание**	**Приложение в космически контекст**	**Очакван ефект върху екипажа**
1. Функционалност	Дизайнът трябва да осигурява максимална ефективност при ограничено пространство и ресурси.	Модулни мебели, сгъваеми структури, интегрирани системи за съхранение.	Повишена продуктивност и намаляване на физическото напрежение.
2. Ергономия	Адаптиране на формите към човешкото тяло в условия на микрогравитация.	Повърхности и интерфейси, оптимизирани за безтегловност и свободно движение.	Предотвратяване на умора и травми; по-добра координация.
3. Адаптивност	Пространството трябва да се трансформира според ситуацията – работа, сън, отдих.	Мобилни стени, панелни конфигурации, променливо осветление.	Повишаване на контрола върху средата и личния комфорт.
4. Сигурност	Избор на материали и форми, минимизиращи риска от нараняване или запалване.	Заоблени ръбове, негорими композити, антистатични повърхности.	Намаляване на инциденти и повишена надеждност на хабитата.
5. Психологически комфорт	Средата трябва да смекчава изолацията и стреса чрез цвят, светлина и форма.	Биофиличен дизайн, динамично осветление, персонализирани елементи.	Подобряване на настроението и социалната комуникация.

6. Материална устойчивост	Използване на рециклируеми и локално достъпни материали (in-situ resource use).	3D печат с реголит или биополимери, повторно използване на отпадъци.	Намаляване на логистичните разходи и екологичен отпечатък.
7. Сензорно преживяване	Акцент върху допир, звук, мирис и визуална хармония за стабилност на възприятието.	Звукоизолация, текстурирани панели, контролирани аромати.	Намаляване на сетивната монотонност и когнитивна умора.
8. Интердисциплинарност	Сътрудничество между инженери, архитекти и дизайнери при всички фази.	Интегрирани проектни екипи и споделени модели (digital twins).	Повишена ефективност и съгласуваност на решенията.

Заключение

Съвременният космически дизайн навлиза в нова епоха, в която инженерната ефективност и естетическото преживяване вече не могат да бъдат разглеждани отделно. Функционалността, безопасността и научната достоверност остават основа, но бъдещите среди за живот в космоса трябва да се изграждат върху човекоцентрична философия, където дизайнът не само поддържа тялото, но и възстановява духа.Ролята на индустриалния и интериорния дизайнер се простира отвъд структурната организация – тя включва изграждане на емоционален и психологически комфорт, осигуряващ усещане за принадлежност, красота и смисъл. Дизайнът става интерфейс между човека и изолацията, който трябва да смекчи усещането за ограниченост и да превърне технологичното пространство в обитаема културна среда.В този контекст се оформя нова посока – биофилният и биоинспириран дизайн, който интегрира живи системи, растителни видове и микроекосистеми. Те не само допринасят за жизнените цикли чрез обмен на кислород и влага, но и възстановяват визуалната и сетивната връзка с природата. Биологичните микроорганизми, фотосинтезиращи алги и дори определени морски бактерии и микро-фауна могат да се превърнат в микробиосферни модули в рамките на интериора – малки живи среди, които поддържат кислороден баланс и носят чувство за живот и динамика в затворените космически хабитати. Визуалният език на бъдещите среди може да бъде допълнен от естетиката на флуоресценцията – светлина, родена от морето, която пулсира с органична мекота и цвят. Флуоресцентните материали и биоинспирирани светлинни системи могат да създадат емоционална архитектура, в която осветлението не само маркира пространството, но и го оживява. Тази светлина е терапевтична – тя намалява усещането за страх и изолация, възстановява усещането за хармония и присъствие. Красотата на флуоресценцията е повече от визуално качество – тя е психологическа защита срещу тъмнината и безкрая, защото красивото прогонва страха.

Формите и материалите на бъдещите космически обители могат да черпят вдъхновение от киното и литературата – от утопиите и антиутопиите, които винаги са предчувствали технологичните промени. Киното дава на дизайна визуална граматика – то учи как да се разказва чрез светлина, композиция и движение. А литературата му придава философия – осъзнаване на човешката уязвимост и силата на въображението. Така се ражда една нова етика на космическия дизайн:дизайн, който мисли за човека като за биопсихологическо, културно и емоционално същество; дизайн, който съчетава живото и изкуственото, светлината и материята, технологията и красотата.Това е дизайн на надеждата – уютен, жив, пластичен и красив, в който всяка линия, светлина и биологична форма напомнят, че дори сред безкрайното мълчание на космоса човекът продължава да създава – не само, за да оцелее, а за да почувства, че е жив. И накрая ще завърша с нещо много човешко и това е мястото за хранене. Защото храненето за нас не е само връзка с място но и с ритуал. По този повод Иво Попов казва: „Мястото за хранене в съвременната къща е едно от най-важните и най-бързо развиващи се в техническо отношение. Неговите принципи обаче са ясно дефинирани и това са преди всичко удобствата при ползване. Ето защо те са една от най-важните части при съвременното планиране на жилището и не могат да бъдат оставени на случайността. Те трябва много добре и в тънкости да се знаят както от архитектите проектанти, така и от дизайнерите на мебелно оборудване“ (Попов, 2009, с. 100) Може би такива места или зони със специфична естетика биха помогнали за формирането на ритъмни навици в безвремието на космическото съществуване и обитания.

Литература:

1. Thiel, A., and Erik Andersson. (2023). *Sensory Design and Emotional Comfort in Extreme Environments.* Design Studies in Space Architecture, 18 (2), 58–81
2. European Space Agency (ESA). (2023). *Human Factors in Space Design Initiative.* ESA
3. Попов, Ст., 2009. *Жилището като удоволствие*. София: Арт & Арх
4. ICON, and NASA. (2023). *Mars Dune Alpha: A 3D-Printed Habitat for Long-Duration Missions.* NASA Johnson Space Center
5. NASA. (2022). *Habitability Design Center – Human Factors Engineering Guidelines*
6. NASA Advanced Materials Lab. (2024). *Sustainable Materials for Additive Manufacturing in Space*
7. Petrov Georgi, Mihova Polina, Andonov Filip, *International Refereed, Journal of Engineering and Science (IRJES)ISSN (Online) 2319-183X, (Print) 2319-1821 Volume 6, Issue 3 (March 2017), PP. 26–30 www.irjes.com 26 Conceptual Framework for Anthropomorphic Simulation of Human Face for Interactive Therapeutic Telepresence Applications*
8. Smith, T., and Laura Garcia. (2021). *Circadian Lighting for Isolated Environments: Results from the ISS-LED Experiment.* Journal of Space Psychology, 14 (3), 22–37
9. HI-SEAS. (2020). *Mission VI: Human Factors and Habitat Performance Report.* University of Hawaii
10. Mars Society. (2022). *Designing for Isolation: Lessons from Mars Analog Missions.* Space Habitat Review, 9 (1), 45–63
11. ESA MELiSSA Project. (2021). *Closed-Loop Life Support and Habitat Integration.*

CGI ТЕХНОЛОГИИТЕ В КИНОТО КАТО СРЕДСТВО ЗА ВИЗУАЛИЗИРАНЕ И ПУБЛИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА КОСМИЧЕСКИ СЪБИТИЯ, ПРОЦЕСИ И ДАННИ

Петко Якимов

Департамент „Изкуства и дизайн“, Нов български университет
e-mail: yakimovpetko@gmail.com

***Ключови думи**: CGI, визуализация, дизайн, Digital Twin, научна комуникация, индустриален дизайн, космически изследвания*

***Резюме:** Статията разглежда възможностите и приложението на технологиите в областта на компютърната графика (CGI) и дигиталните визуализационни методи в киното като средство за представяне на космически събития и процеси в подкрепа на научни изследвания и образователни дейности. Представени са основни методи и инструменти за 3D симулации и специални ефекти, чрез които се пресъздават явления, случващи се единствено в условията на космическа среда. Разглеждат се примери за визуализации на астрофизични процеси – взривове на звезди, поведение на черни дупки, мъглявини, планетарни системи, както и структурни визуализации на материали и технологии. Акцентът е поставен върху двата полюса на визуалната комуникация – кино естетиката и инфографската стилистика – и тяхната синергия в научното представяне на космоса.*

CGI TECHNOLOGY IN CINEMA AS A MEANS OF VISUALIZING AND PUBLICLY PRESENTING SPACE EVENTS, PROCESSES, AND DATA

Petko Yakimov

Department of Arts and Design, New Bulgarian University
e-mail: yakimovpetko@gmail.com

***Keywords**: CGI, visualization, design, Digital Twin, scientific communication, industrial design, space research*

***Abstract:** The article examines the possibilities and application of technologies in the field of computer graphics (CGI) for creating special effects and 3D simulations in cinema as a means of representing space events and processes in support of scientific research and educational activities. The report presents methods and tools of CGI for recreating various types of processes and events that can occur solely in a space environment. Examples include astrophysical phenomena such as star explosions, the behavior of black holes, nebulae, planetary systems, and material structures visualized through both stylized and photorealistic approaches. The emphasis is placed on the dialogue between cinematic aesthetics and infographic precision in communicating science.*

Въведение

Космическите явления, които се изследват в съвременната астрофизика, често са недостъпни за пряко човешко възприятие. Наблюденията от сателити, радиотелескопи и сонди предоставят огромни масиви от данни, които изискват визуална интерпретация, за да станат разбираеми. Тук се появява ролята на CGI технологиите, които обединяват методите на киното, 3D компютърната графика и симулацията на физически процеси, за да създадат научно достоверна и естетически въздействаща визуализация.

Киното, като визуално повествователно изкуство, притежава инструментариум, способен да възпроизведе реалността чрез симулация – камера, монтаж, композиция, светлина и движение. В контекста на космическите изследвания този инструментариум се разширява

чрез 3D моделиране, процедурни системи (Houdini, Maya, Blender, Rhinoceros3D, Solidworks), физически рендери (RenderMan, Arnold render, Redshift, Clarisse) и реалновремеви енджини (Unreal Engine, Unity,).

CGI като мост между наука и възприятие

CGI визуализацията може да се разглежда в два подхода:

- Кино стилистика (Cinematic Visualization) – фотореалистични рендери, драматична композиция и движение, които предизвикват емоция и ангажираност. Примери: Gravity, Interstellar, The Martian;
- Инфографска естетика (Data-driven Visualization) – графики и модели, които представят информацията аналитично и системно. Примери: визуалните материали на ESA за Rosetta и ExoMars.

Двата подхода имат съществена роля – кино визуализацията вдъхновява, а инфографската изгражда доверие. Синтезът между тях формира нов визуален език на научната комуникация.

Експерименталните симулационни среди могат да бъдат ползвани успешно като източник на визуални данни, поради няколко причини: ясно представяне на сложни процеси и възможност за съвместна работа на екипи върху даден проблем непосредствено без те да присъстват на едно и също място, достъпност на данни и резултати до широк кръг от хора и възможност за атрактивно представяне на постигнати резултати или презентиране на идеи и процеси пред инвеститори и партньори. Практиката показва,че в космическите изследвания се използват разнообразни симулационни съоръжения – TVAC камери, центрофуги, прахови камери, параболични полети. CGI реконструкциите позволяват визуално пресъздаване на тези експерименти в реален мащаб. Примерите включват практиките на редица центрове, сред които: ESA Test Centre (ESTEC, Нидерландия), Centre Spatial de Liège (Белгия) и Einstein Elevator (Германия). Тези центрове предоставят визуални данни, които често се трансформират в CGI базирани визуализации, свързващи научните резултати с публичната комуникация.

От научни данни към кино визуализация: методологичен модел

Процесът на визуализиране на научни данни включва няколко последователни етапа:

1. Събиране на данни (експерименти, наблюдения, симулации);
2. Анализ и обработка (CFD, Digital Twin, статистически анализ);
3. Инфографска визуализация (графики, 2D/3D модели, интерактивни панели с линейна или интерактивна система на достъп до ресурси и етапи);
4. Кино визуализация (2D/3D рендеринг, анимационно движение, дикторски глас, звукови ефекти, музика, динамична композиция и монтажни връзки свързващи наратива);
5. Хибридна визуализация (реални данни + стилизирана или кино естетика естетика, а обикновенно и двете в комбинация като слоеве на инфографски разказ).

Ролята на изследователя-художник в научния екип

Също както се проектират интериорни пространствени решения се изисква следването на методика и правила, на методика се следва и системна логика при визуализацията и изграждането на аудиовизуален разказ. Можем да направим паралел с визуализацията на проект за екзпозиционно пространство, описано като стъпки при дизайн процеса от Иво Попов. „След разпределяне на зоните и ходовите линии се пристъпва към творческата част на идейния проект. На база на тематичния план се създават триизмерни скици, които илюстрират основното виждане на пространствения дизайнер за някои от ключовите зони в музея. В тези скици се представя предварителната идеята за композиционната пластика на помещенията, стените, таваните и подовете, както и евентуално използваните в тях материали, витрини и подиуми. Предлага се цветовата гама. Показва се идеята за начина на експониране на предметите и информационните табла. Обмислят се художественото осветление, приложната графика и визуалната комуникация на експозицията. (Попов, И. стр. 208, 2015) В изложената методология лесно можем да проследим етапите на проектирането и преминаването от комуникирането на идеята, очертаването на решението и тук нататък следват чертежи и 3D визуализация на решението. Както в примера, така и в областта на инженерния дизайн, изследователят-художник (Research Artist) е медиатор между научното съдържание и визуалното му възприятие. Той трансформира данните в разбираеми, емоционално въздействащи и културно значими форми – филми, графики, 3D среди и интерактивни модели. Подобни практики се развиват активно в NASA Art Program, ESA Visual Lab и MIT Media Lab. Ролята му е не само естетическа, но и комуникационна – той превръща инженерни данни в достъпна форма, която

може да бъде разбрана и от неспециалисти. Това има значение и за финансирането на научни проекти, тъй като визуализацията често е първият контакт между науката и обществото. Инструментариумът му обхваща: форма, материалност, цвят, светлина, движение и наратив – всички подчинени на логическа и комуникативна структура.

Индустриалният дизайнер като част от научно-развойния екип

Художникът може да участва и в развойната дейност като индустриален дизайнер, интегрирайки инженерните, ергономичните и визуалните параметри на проекта още на етап концепция.

Таблица 1. Роля на индустриалния дизайнер в процеса на проектиране на космически хабитат

Етап	Основна задача	Инструменти
1. Изследване	Анализ на мисии и среда	Интервюта, VR симулации
2. Концепция	Модулност, материали	SolidWorks, Maya, Houdini
3. Прототипиране	3D печат, макети	Unreal Engine, Fusion, Substance
4. Тестване	Ергономия, осветление	Digital Twin, CFD/UX анализ
5. Визуализация	CGI, инфографики, филми	Nuke, Fusion, Illustrator

Софтуерен инструментариум за CGI визуализации и Digital Twins

Digital Twin представлява виртуално копие на реален обект, процес или система, което се държи и променя така, както реалният му еквивалент (Petrov G., Vasilev, pp.1–8 V., 2024). Това е динамичен 3D модел, свързан с реални данни, визуализиращ поведението на реалния обект във времето – жива симулация, която „диша“ с реалната система.
Три нива на взаимодействие:

1. Физически обект – напр. космически хабитат или лабораторен модул;
2. Виртуален модел – 3D репрезентация със симулирано поведение;
3. Данни – които свързват реалността и виртуалното пространство.

Таблица 2. Софтуерен инструментариум за CGI визуализации и Digital Twins

Софтуер	Приложение	Основна функция
Houdini	Procedural 3D Simulation	Физически симулации, VFX, динамика
Unreal Engine	Real-time Visualization	Визуализация в реално време, интерактивност
Maya	Modeling and Animation	3D моделиране, анимация
Nuke	Compositing /3D Compositing	Композитинг и постпродукция / на по-високо ниво/
Fusion	Motion Graphics/ Compositing	Композитинг и motion дизайн
RenderMan/ Arnold render/ Clarisse/ Redshift ...	Rendering	Фотореалистично рендериране
Substance 3D, Mary	PBR Texturing	Материали и текстури за научни сцени

Примери:

- 3D модел на спътник, визуализиращ телеметрични данни от орбита;
- Виртуална станция на Марс, където сензори за температура и CO_2 влияят в реално време;
- Интерактивна CGI среда за тестове на материали и конфигурации.

В един научен проект дизайнерът заема ключова позиция между лабораторията и пазара, превръщайки визуализацията в инструмент за комуникация, финансиране и обществена подкрепа. Същевременно CGI визуализациите улесняват представянето на научни и инженерни проекти пред инвеститори и институции, превръщайки сложни концепции в разбираеми визуални наративи. Това е пряка обществено-комуникационна роля и връзка между космическата наука, индустрия и бизнеса като потребител на услуги. Но тези възможности са и отговорности, защото дизайнерът изгражда доверие чрез визуалния език на киното и инфографиката, превеждайки науката на разбираем език за обществеото възприятие. Силата на CGI визуализацията е, че тя позволява ранно валидиране на концепции и с това намалява разходите. Причината е че така се ускорява иновационния цикъл чрез симулации, вместо физически прототипи, които неминуемо се изискват, но биха били изместени в последващ развоен етап.

Заключение

CGI технологиите и дигиталните визуализации се утвърждават като нов език на науката, който обединява естетика, информация и технология. В този контекст дизайнерът е не само творец, но и медиатор, свързващ лабораторията с обществото, а данните – с възприятието.

CGI технологиите и дигиталните визуализации се утвърждават като нов език на науката, който обединява естетика, информация и технология. В тази синергия киното играе фундаментална роля – неговата визуална граматика и повествователен опит придават на научните данни не само форма, но и емоционално въздействие.

Съвременните кино технологии, развиващи се в посока на реалновремеви визуализации, XR среди и интеграция между физическа и виртуална реалност, променят самия дизайн процес. Комбинацията между CGI, VR, AR и MR позволява на изследователите и дизайнерите да експериментират в имерсивни симулации, да валидират концепции и да споделят визуално мислене още на най-ранните етапи от разработката. Тези технологии превръщат дизайнера в активен член на научния екип – дизайнер-разработчик (designer-developer), който не само визуализира, но и моделира самия процес на изследване. Той участва в изграждането на Digital Twin модели, в създаването на интерфейси за взаимодействие и в развитието на мултидисциплинарни визуални системи, които обединяват науката, инженерството и естетиката. В този контекст CGI, VR, AR и MR не са просто инструменти, а комуникационна тъкан между отделните специалности – инженер, учен, дизайнер, програмист. Те позволяват колаборация в реално време, по-добра разбираемост на сложни явления и ускорено вземане на решения.

Кино естетиката осигурява на тези среди универсален визуален език, чрез който научните открития могат да бъдат разказани и преживяни, а не просто показани. Тя обединява рационалното и емоционалното възприятие, правейки визуализацията не само доказателствен, но и вдъхновяващ инструмент. Следователно ролята на дизайнера-разработчик придобива стратегическо значение – той не е просто медиатор между лабораторията и обществото, а активен участник в научното съзидание, който оформя начина, по който човечеството възприема, разбира и проектира бъдещето си в космоса и отвъд него.

Литература:

1. Petrov G., Vasilev V., Blockchain integration in measurement systems: enhancing industrial data login systems. Electrotechnica & Electronica (E+E), Vol. 59 (1), 2024, pp. 1–8, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603–5421 (Online)
2. Thorne, K. (2014). The Science of Interstellar. W.W. Norton & Co. European Space Agency (ESA). (2023). *Human Factors in Space Design Initiative.* ESA
3. Попов, И. (2015) „Етапи в проектирането на пространствения дизайн на музеи“, сборник с научни текстове по проект №BG051PO001-3.3.06.-0060, том 2, издание на НБУ с редакционна колегия проф. Людмил Христов, проф. д-р Николай Ненов, доц. д-р Ирена Бокова и доц. д-р Антоний Гълъбов и с рецензенти доц. д-р Магдалена Елчинова, доц. д-р Валентина Ганева-Маразова и доц. д-р Тома Томов, издателство на НБУ. стр. 202–242
4. NASA Scientific Visualization Studio. (2023). https://svs.gsfc.nasa.gov. (Online)
5. European Space Agency. (2022). ESTEC Test Centre Overview. https://technology.esa.int (Online)
6. Nieborg, D., et al. (2021). Cinematic Science: Visual Aesthetics and the Public Imagination. Springer
7. Angelantoni Test Systems. (2021). Thermal Vacuum Chambers for Space Applications
8. ESA Visual Design Lab. (2020). Rosetta Mission Visual Communication Case Study
9. Epic Games. (2023). Unreal Engine for Science Visualization
10. SideFX. (2022). Houdini Procedural Simulation for Space Environments
11. Autodesk. (2023). Maya for Aerospace Visualization
12. Adobe Substance 3D Team. (2023). PBR Texturing for Scientific Visualizations.

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

ХРОНОЛОГИЯ И АСТРОНОМИЯ В ЕВАНГЕЛИЕТО НА ПОП МИНЧО ОТ СЕЛО ДЪБЕНЕ

Ангел Манев, Динко Господинов, Таньо Танев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: amanev@abv.bg

Ключови думи: *история, хронология, астрономия, Дъбене, поп Минчо*

Резюме: *Предлаганото изследване, в контрапункт на другите изследователи, дава почти точен прочит на схемата в Евангелието на поп Минчо, чисто графически и астрономически. В анализа са включени интердисциплинарни знания. Направено е правилно разчитане на схемата. Приложен е съвсем различен подход към записаните четирицифрени числа около схемата, обоснован на реални астрономически събития. Показано е, че в изследваната рисунка, са закодирани знания, не характерни за епохата, когато е създавана схемата. Доказани са част от записаните години. Демонстрираната нова посока на изследванията, генерира редица нови изследователски хипотези.*

CHRONOLOGY AND ASTRONOMY IN THE GOSPEL OF POPE MINCHO FROM THE VILLAGE OF DABENE

Angel Manev, Dinko Gospodinov, Tanyo Tanev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: amanev@abv.bg

Keywords: *history, chronology, astronomy, Dabene, priest Mincho*

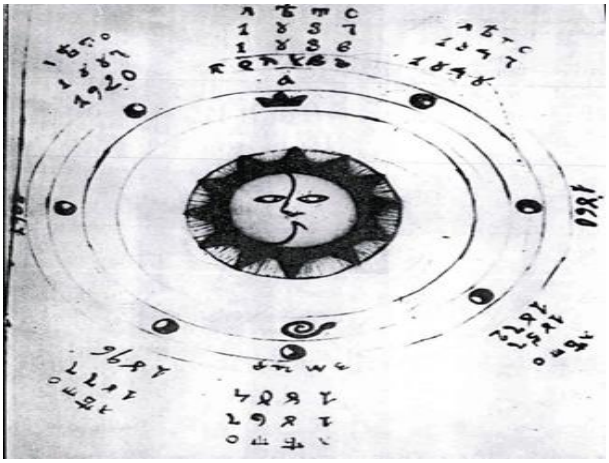
Abstract: *The proposed study, in counterpoint to other researchers, gives an almost accurate reading of the scheme in the Gospel of Father Mincho, purely graphically and astronomically. Interdisciplinary knowledge is included in the analysis. A correct reading of the scheme has been made. A completely different approach has been applied to the recorded four-digit numbers around the scheme, based on real astronomical events. It has been shown that the studied drawing encodes knowledge that is not typical of the era when the scheme was created. Some of the recorded years have been proven. The demonstrated new direction of research generates a number of new research hypotheses.*

Доколкото мястото на Историята е спорно сред множеството материалистически науки, се налага при историческите изследвания, да се прилагат интердисциплинарен научно-изследователски процес при анализите на недвижимите исторически паметници. Това е залегнало и в българското законодателство в Наредба № Н-00-0001 от 14.02.2011 за извършване на теренни археологически проучвания чл. 4 (2) и чл. 56 (2) от Закона за културното наследство в България. Законовото изискване, независимо доколко се спазва, отваря широко вратите за използването на интердисциплинарни знания при изучаването на недвижимото културно наследство. В България все още се гледа снизходително на включването на други, не историци, при интерпретацията на съществуващи, доказани материални факти, свързани с Българската история. Така се дава възможност на чужди изследователи да доминират при тълкуването на нашите културно-исторически паметници.

Настоящото изследване представлява опит за тълкуване на една рисунка в Евангелието на поп Минчо от село Дъбене. Тълкуванията са направени на базата на астрономически, хронологически и духовни знания, надминаващи границите на локалното изследване. Прилаганите експериментални модели, могат да се коригират и или развиват от широк кръг от специалисти. Изследването не представлява „абсолютната истина“, а поставя на

вниманието на учените въпроси, които надхвърлят официалните знания за епохата, когато е създадена схемата на поп Минчо.

В своята книга „Календар и слово” [1], на страница 113, писателят Йордан Вълчев съобщава, че върху първия празен лист от евангелието на свещеника Минчо (Мина) Хаджипопнедев от село Дъбене, Карловско, е нарисувана и начертана с пергел особена рисунка, показана на фигура 1. За поп Минчо и днес се говорят интересни неща в Карловско. Той е съратник на Левски, организатор на Априлското въстание, човек с характеристики далеч надвишаващи средните характеристики на българина по това време. Ние не сме сигурни, че тази рисунка е дело на поп Минчо, тъй като не сме направили анализ на мастилото на рисунката и дали то съответствува на мастилата, които са използвани по времето на поп Минчо. Но тъй като нямаме доказателства за друго авторство на картината, приемаме работното название „Рисунката на поп Минчо”.



Фиг. 1.

Какво вижда Йордан Вълчев на тази рисунка? Върху рисунката са записани по определен начин датировки и символи на години от прабългарския календар. Записано е също така, че Земята и Юпитер-Янкул са „вързани заедно” при обиколките им около Слънцето. За това, според Вълчев, те са изобразени като едно двулико лице, съставено от половинките от лицата на жена-Земята-анфас и на мъж-Юпитер-Янкул- в ляв профил. Двуликото лице е поместено в малък вътрешен кръг на „зъбчато колело” с 12 броя зъби /или лъчи/. Дясното око на жената косо гледа към лявото, също косо гледащо око на мъжа от двуликия образ, който, заедно с малкия вътрешен кръг и дванадесетте броя зъби-лъчи на „зъбчатото” колело, според Вълчев, точно съответствува на 12-годишните календарни цикли. През тези цикли трябва да преминат Земята и Юпитер-Янкул, за да опишат своите звездни кръгове около Слънцето. Вторият външен кръг от фигурата с почти два пъти по-голяма ширина е „празен”. След него следва трети външен кръг, върху който има символите на гребен на петел и змия. Следва четвърти външен кръг с „осем колелца, хармонично /симетрично – б.а./ разпределени върху този кръг”. Според писателя Йордан Вълчев, „осемте колелца върху четвъртия кръг от фигурата са четирите посоки и четирите подпосоки на света, които се разпознават по Слънцето”. След четвъртия кръг следва пети, най-външен кръг, върху който над гребена на петела е записано „петел”, а под символа на змията е записано „змия”. Разглеждайки долния ред години от фигурата – от 1836 до 1920 г., писателя Йордан Вълчев забелязва, че това са 7 пълни 12-годишни календарни (юпитерови) цикли. Външния ред години от рисунката – от 1837 до 1887 г., писателят не ги разглежда и не ги интерпретира. И все пак той задава въпроса защо поп Минчо поставя в долния край на рисунката си Змия (Дилом) след като нито една от записаните години не е Дилом, Змия? И писателят прави заключението, че поп Минчо, „макар и смътно, е знаел,че тази година с нещо е важна през нашата древност и я поставя – най-отдолу, сякаш в дълбочината на времето като символ на древността.

На стр. 185 от книгата на Вълчев „Календар и слово” относно изображенията на Юпитер и Луната върху една от стените на черквата в Лесновския манастир, където се казва: „да се разпознава Луната по левия отвор на нейния сърп, а Юпитер да се разпознава по десния отвор на неговия сърп и по трите пламъка, които буйно излитат от него”. Да анализираме отново рисунката на поп Минчо. Имайки предвид казаното за Юпитер и Луната, виждаме, че от двойния образ на рисунката ни гледат не Земята и Юпитер, а Слънцето и Луната. Със светлите и тъмни лъчи от малкия вътрешен кръг поп Минчо е изобразил светлата и тъмна част на

денонощието, като тъмните лъчи правилно сочат 12-те зодиакални съзвездия, намиращи се върху кръга с гребена на петела и змията, и които се виждат с просто око само нощем. По двойно широкия вътрешен кръг, преминавайки през дванадесетте зодиакални съзвездия, Земята, заедно с Луната, прави своя звезден кръг около Слънцето и след дванадесет земни месеци се връща в изходното зодиакално съзвездие, от където е тръгнала, за да отбележи своите земни звездна и календарна години. По външния четвърти кръг Юпитер-Янкул, /кръгче с десен отвор на сърпа в него!/, преминавайки през всяко от зодиакалните съзвездия, за дванадесет земни звездни и календарни години извършва своя звезден кръг около Слънцето и също се връща в изходното зодиакално съзвездие, от което са тръгнали заедно със Земята, за да отбележи своите земно-юпитерови звездна и календарна години. По този начин Земята и Юпитер-Янкул, както е записал и поп Минчо, са „вързани" при обиколката им около Слънцето. При това, вероятно, Юпитер има освен началната точка, маркирана с буквата „а" и седем други важни точки от своята орбита, по която обикаля около Слънцето и които също са „вързани" със Земята.

До тук изложените от Йордан Вълчев астрономически тълкувания са правилни и адекватни на древните знания. На лице е и принципът на Дванадесетичността, свързан с дванадесетте зодиакални съзвездия, залегнал в болшинството слънчеви календарни системи. Правилна е интерпретацията на Юпитер. До колко това може да има причинно-следствена връзка с определена календарна система е спорно, защото тези принципи са заложени в множество слънчеви календари.

Каква е нашата интерпретация на Рисунката?

1. Нашият прочит на надписа „петел" показва, че разчитането направено от Вълчев е неправилно. Всички следващи изследователи, които се позовават на това разчитане, безусловно са тръгнали в погрешна посока. Защото внимателното прочитане на думата сочи не „петел" а „пелквъ"! Що се отнася до значението на думата „пелква", тя, според тълковните речници на български [2] и старогръцки [3], като дума пелквъ, пелка, пелке и пелкъ, означава двойна секира, която от едната страна е брадва за сечене на дърва, а от другата – топор за окастряне и дялане на отсечени дървесни трупи. „Пелка-та" или „пелквъ-та" е двойна секира, в която чрез общата работна дръжка, сап, са съединени в една две отделни по вид и предназначение секири – брадва и топор.

От този момент изследването тръгва в друга посока.

В древен български надпис от Мурфатлар е записано: „Подвижните светила са седем. Небесен господар им е Слънцето. То и Юпитер, време господарят, управлява." От текста за нас особен интерес представлява не толкова Слънцето, колкото Юпитер, определен като господар на времето. Всички единици за измерване на времето – секунда, минута, час, денонощие, година са в съответствие с периода на обиколката на Юпитер около Слънцето.

Пелквъта и двойна секира в която чрез обща работна дръжка – сап, са съединени в една две отделни по вид и предназначение секири – брадва и топор. От дълбока древност се знае, че брадвата е символ на царска власт и достолепие. Още древните египтяни са означавали Бог или богопомазан владетел с йероглиф подобен на брадва, знаме или перо. И по нашите земи са открити множество царски погребения в които присъствува единична или двойна брадва като владетелски символи.

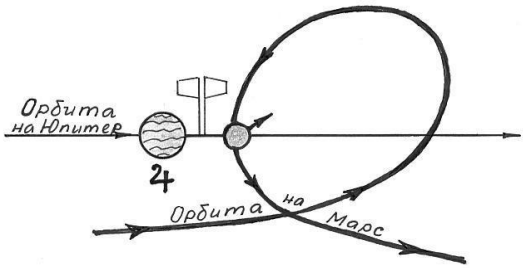
От небесната планисфера на „Археометъра" на Сент Ив Д'Алведр [4] виждаме, че на планетата Юпитер съответствува ватанската планетарна буква „Да", чието общо сакрално значение е деленето и отдаването, разпределението и разпръскването, провидението и материалното опазване на съществата. Буквата „Да" в свещената дума Ша-Да-Й означава Бог, отдаващ себе си в жертва на съзиданието, запазването и изкуплението на съществата т.е. слизане в материята, (чийто символ е жената – б.а.) и запазване на съществата чрез минаване през смъртта и възкресението.

Тези разсъждения водят до извода, че и тълкуването на „гребена на петела" не е вярно. „Гребенът на петела", според Вълчев и други изследвачи, според нас, не е „гребен на петел", а е символът на отворената царска (слънчева – б.а.) корона, поставена в кръга с рисунката на змията, намиращ се между кръга на планетата Юпитер и кръга на системата Земя-Луна. Отворената царска корона символизира планетата Марс. Според небесната планисфера на „Археометъра" на Сент Ив Д'Алведр на планетата Марс съответствува ватанската планетарна буква „Ка", чието общо сакрално значение е Въздухът, Водата, Светлината, тялото, главата, Душата, Времето, Царят, Князът, времето в пространството, пространството в интелигентната сила, която съставлява и твори, психогоничен и психологичен потенциал, свързващ безкрайностите помежду им.

Брадвата сече, прекъсва жизнени функции, дейност, отредена на Боговете, а топорът се използва и като бойно оръжие – атрибут на царете. Поради това ние считаме, че брадвата символизира Богът Юпитер, а топорът – Царят Марс. На рисунката от евангелието на поп

Минчо изобразените символите на Юпитер и Марс са поставени точна на местата на техните орбитални кръгове.

Това са причините изследването да се насочи към анализ на особени разположения на планетите Марс и Юпитер. Технологията, която използвахме, се прилага за първи път при такова изследване. Анализирано е движението на планетата Марс спрямо „неподвижно" застаналия върху небесната планисфера Юпитер. Моделирането е проведено с използването на системата за планетарно моделиране RedShift [5]. За начало се приема указаната от поп Минчо 1837-ма година. Още повече, че под тази година е поставена буквата „а" – началото! През тази година на 18 март на небето се наблюдава уникално явление – особено движение на планетата Марс около планетата Юпитер, наподобяващо като че ли танц, на пристигащия по своята орбита Цар, около неподвижно стоящият Бог. В астрономията това е познатото ретроградно движение на планетата. Това е показано на фигура 2.



Фиг. 2.

В точката, когато двете планети са най-близко една до друга, става съединяването на двете секири – брадвата на Бога Юпитер и топорът на Царя Марс. Получава се небесната пелквъ. Небесни пелкви е имало в годините преди новата ера, имало е и ще има в годините от новата ера, както следва [13]:

11.06.943 г. пр.н.е.	20.12.118 г. н.е.	29.08.1119 г. н.е.	17.04.2123 г. н.е.
12.08.791 г. пр.н.е.	10.01.261 г. ,,--,,	20.11.1262 г. ,,--,,	- - - - - -
01.11.648 г. ,,--,,--,,	24.01.404 г. ,,--,,	10.01.1408 г. ,,--,,	
12.09.505 г. ,,--,,--,,	20.02.547 г. ,,--,,	28.01.1551 г. ,,--,,	
10.05.363 г. ,,--,,--,,	20.03.690 г. ,,--,,	16.02.1694 г. ,,--,,	
16.10.219 г. ,,--,,--,,	13.04.833 г. ,,--,,	**18.03.1837 г. ,,--,,**	
05.11. 76 г. пр.н.е.	22.07.976 г. н.е.	07.04.1980 г. н.е.	

Или небесните пелкви от 943 г. пр.н.е. до 2123 г. н.е. са се случвали средно на всеки 143,6г., период съгласуващ се достатъчно добре с периода от 144 г. Към този период ни насочват разсъжденията за Юпитер и Марс от 1837-ма година. За такава периодичност на небесни явления в литературата няма данни и никой до сега не е анализирало такова събитие във времето! Ние за пръв път достигнахме до това знание благодарение на отправната точка (годината 1837-ма), дадена в рисунката на поп Минчо! Възможно е в други исторически паметници, също да е изобразено това взаимно движение на двете планети, и това да е свързано с определени исторически събития. Вратата на изследователите е отворена…..

2. Що се отнася до записа „змия" върху рисунката, поп Минчо описва реално небесно явление, което вероятно също по някакъв начин е свързано с планетата Земя. От 29.11 до 01.12.**1867 г**. планетите Юпитер, Луна, Венера, Марс, Слънце, Сатурн, и Меркурий са били подредени във вид на „змия" с глава Юпитер във Водолей низко над хоризонта в посока югоизток-юг-югозапад на небесната планисфера [13]. Отново отворена врата за изследване….

Направените по-горе разсъждения, насочват към анализ и на „празния" след този на Юпитер, пети кръг от Рисунката. Ако те се свържат с планетата Сатурн и движението на Юпитер спрямо нея, могат да се получат неочаквани резултати…..

Литература:

1. Вълчев Йордан, Календар и слово – София, 1986 год. изд. Български писател
2. Найден Геров, Речник на българския език, т. 4, П (1901 г.), София, 1977 г.
3. Старогръцко – български речник , София, 1943 г.
4. Saint-Yves, D'Alveydre, L'Archéomètre, Guy Trédaniel 1912, 65, rue Claude-Bernard, 75005 Paris
5. Мултимедиен продукт в астрономията „Redshift – 3" – прод. "Maris Multimedia".

Session 3

Remote Sensing and Geoinformation Systems

Chairmen: Prof. Lachezar Filchev

Secretary: Chief Assist. Petru Ciocani, PhD

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

ПРИЛОЖЕНИЕ НА СПЪТНИКОВИ ДАННИ ОТ SENITINEL-2 ЗА МОНИТОРИНГ НА СНЕЖНАТА ПОКРИВКА НА ТЕРИТОРИЯТА НА ПИРИН ПЛАНИНА ЗА ПЕРИОД ОТ 10 ГОДИНИ

Андрей Стоянов

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), снежна покривка*

Резюме: *В проведеното изследване са представени резултати от извършен мониторинг на снежната покривка от територията на Пирин планина при над 1000 m надм. в. чрез използване на оптични спътникови изображения от Sentinel-2 MSI за период от 10 години (2015–2025). Извършена е обработка на псевдокомпозитни изображения, генериран е нормиран разликов снежен индекс NDSI за месец април, от всички години от времевия период и на база получените стойности от използвания индекс е проследена динамиката на пространственото разпределение на снежната покривка за изследваната територия. Определени са индивидуални прагови стойности за всеки генериран NDSI индекс, от използваните оптични спътниковиизображения и са получени резултати, включващи изчисление на площите заети от снежна покривка през изследвания период.*

APPLICATION OF SENTINEL-2 SATELLITE DATA FOR MONITORING SNOW COVER IN TERITORY OF PIRIN MOUNTAIN FOR PERIOD OF 10 YEARS

Andrey Stoyanov

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

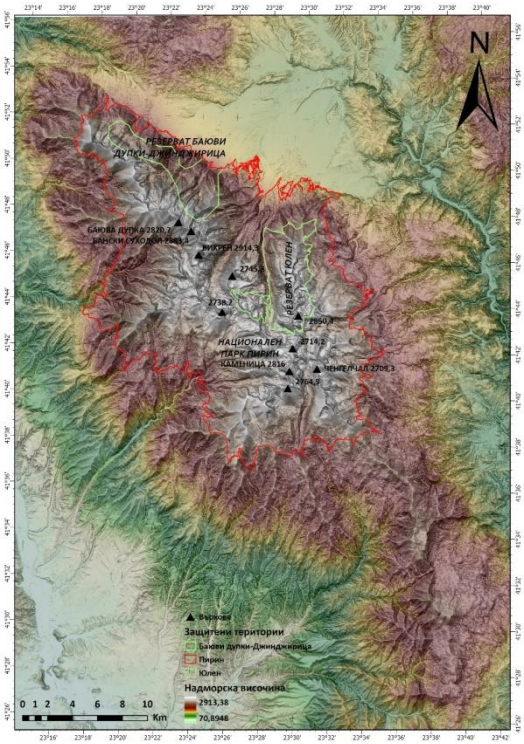
Keywords: *Satellite data, Sentinel-2, Normalized Difference Snow Index (NDSI), snow cover*

Abstract: *The study presents results of monitoring the snow cover in the Pirin Mountains at over 1000 m above sea level using optical satellite images from Sentinel-2 MSI for a period of 10 years (2015–2025). Pseudo-composite images were processed, a Normalized Difference Snow Index (NDSI) was generated for the month of April, from all years of the time period, and based on the values obtained from the index used, the dynamics of the spatial distribution of snow cover for the studied territory was monitored. Individual threshold values were determined for each generated NDSI index from the optical satellite images used, and results were obtained, including a calculation of the areas occupied by snow cover during the studied period.*

Въведение

Процесите свързани с промяната на глобалния климат включавщи „глобалното затопляне“ и тендецията на „засушаване“ на климата особено силно изразено на територията на Европа [1] оказват пряко негативно влияние върху общите количества на снеговалежите, както и върху снеготопенето и снегозадържането, в частност и на територията на Р. България. През последното десетилетие се проявява тенденция на зачестяване на т.нар. „безснежни“ и по-топли зими, особено в териториите разположени под 1000 m надм. в., което съответно има своите негативни ефекти върху селското стопанство, горските ресури, водните запаси, и засилване процесите на „засушаване“ и „опустиняване“. Някои от основните фактори оказващи негативно влияние върху образуването и задържането на снежната покривка са намаленото средно количество на снеговалежите, и увеличените средни стойности на температурата на въздуха и почвата [2].

В настоящото изследване са представени част от резултатите получени от проект „*Мониторинг на сезонната динамика и устойчивост на снежната покривка в планинския пояс на Р България за период от 10 години (2014–2024) на база Дистанционни изследвания*“, обхващащ териториите разположени над 1000 m надм. в., като обект на изследване в настоящото изследване е избрана територията на Пирин планина, заемаща площ от 2585 km^2 [3] (Фиг. 1). В нейната територия попадат Национален парк „Пирин“ (403,56 km^2) и природните резервати „Юлен“ и „Баюви дупки – Джинджирица“ [3]. Времевата рамка на изследването обхваща периода 2015–2025 г., като е избран месец април от всяка година, чиито получени данни служат като индикатор за устойчивостта на снежната покривка (сняг, който се задържа не по-малко от един месец) за съответната година.



Фиг. 1. Карта на обекта на изследване – Пирин планина

Методика

Методиката за мониторинг на снежната покривка включва: придобиване и обработка на „мозайки“ от оптични спътникови изображения от Landsat 8 OLI-TIRS [4] Sentinel-2 MSI [5] в Google Earth Engine (GEE) [6] и Arcgis Pro **=>** генериране на растерен псевдокомпозит на всяко изображение („мозайка“) в комбинация на каналите КВИЧ-ИЧ-Зелен – 7-5-3 за Landsat и 11-8-3 за Sentinel-2, очертаващ пространственото разпределение на териториите заети от сняг **=>** генериране на снежния индекс NDSI (1) [7] **=>** определяне на прагова стойност за всеки отделен генериран индекс чрез визуална интерпретация и използването на класификация в софтуера Arcgis Pro **=>** рекласификация на стойностите от индекса **=>** генериране на векторна „маска“ на снежната покривка **=>** изчисление на териториите заети от сняг за всяка избрана година **=>** верификация с климатични данни **=>** сравнение, интерпретация и анализ на получените резултати.

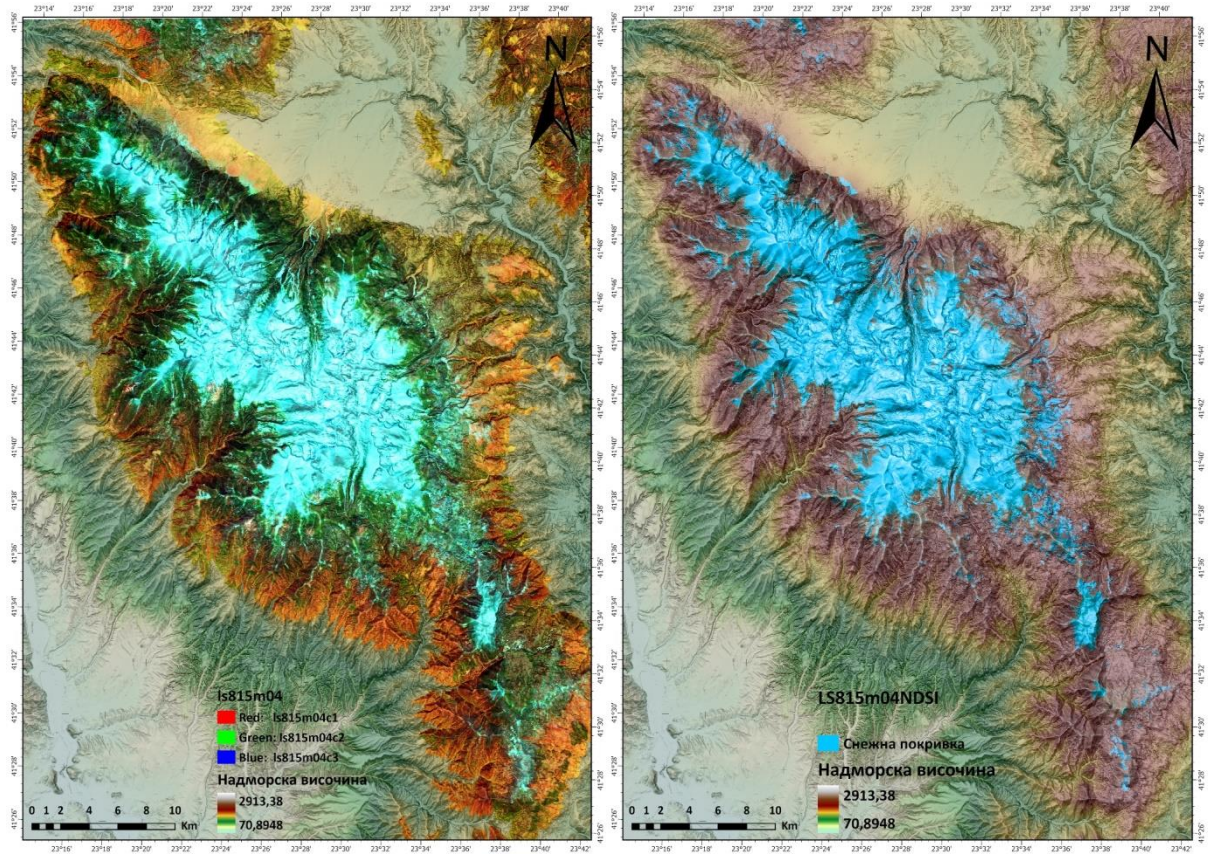
(1) $$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}$$

Общоприетата прагова стойност, използвана за определяне на наличието на сняг е NDSI >0,4, но някои изследователи предлагат, NDSI да бъде настроен според конкретната ситуация с методи за избор на прагова стойност, въз основа на визуална проверка/интерпретация, емпирична връзка или автоматизиран подбор [8, 9].

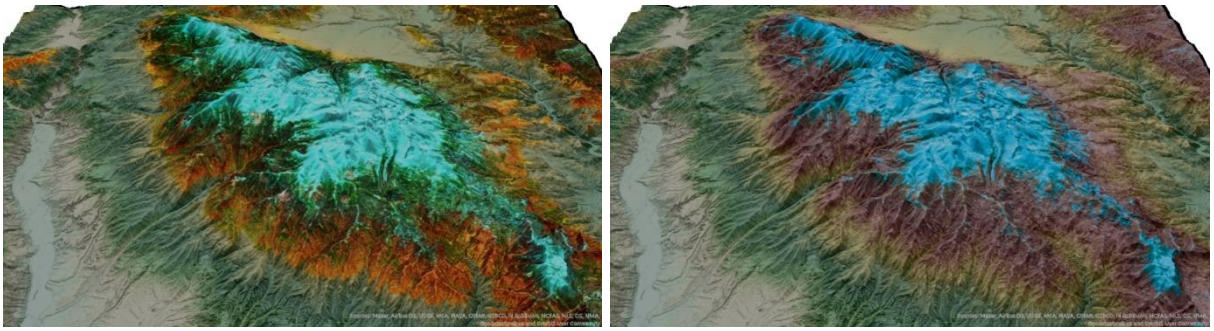
Данните получени от генерирания код в GEE представляват мозайки от оптични изображения от Landsat 8 OLI-TIRS и Sentinel-2 (с „облачност“ вариращa от 0–40%), избрани през съответния месец, като на всяка декада от месеца чрез визуална интерпретация са проследени наличието и промяната в пространственото разпределение на снежната покривка от изследваната територия.

Резултати

Приложените фигури са представителна извадка за годините 2015 и 2025, от целия период на изследване 2015–2025 г., показващи част от резултатите получени от приложената методика за мониторинг на снежната покривка. На фиг. 2 и фиг. 3 са представени карти в координатна система BGS 2005 – CCS 2005 с Ламбертова конформна конична проекция на псевдокомпозитно изображение на Landsat 8 OLI-TIRS, генерирано от GEE, в комбинация на каналите 7-5-3 и снежна „маска“ за обекта на изследване, където е визуализирано пространственото разпределение на снежната покривка за м. април, 2015 г. Индивидуалната прагова стойност на NDSI, която е определена при извършването на рекласификация на първичните стойности генерирани от индекса е 0,58. Площта на снежната покривка възлиза на 342,01 km^2 като нейната граница по надморска височина започва приблизително от 1500 m. Резултатите получени за месец април 2015 г. служат като начална темпорална точка при извършването на мониторинг и анализа на състоянието на снежната покривка през изследвания времеви период.

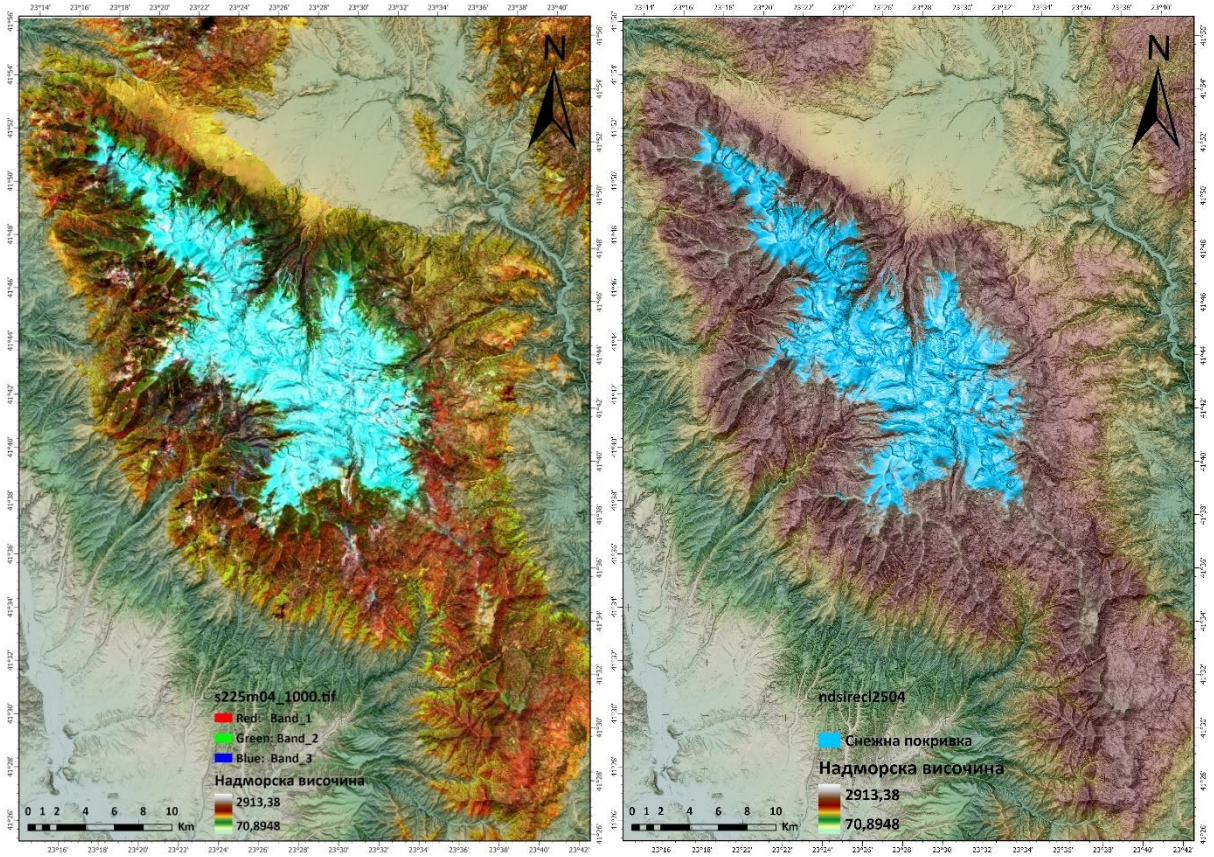


Фиг. 2. Карта на псевдо-композитно изображение от Landsat 8, в комбинация на каналите 7-5-3 и векторна снежна „маска“ за месец април 2015 г.

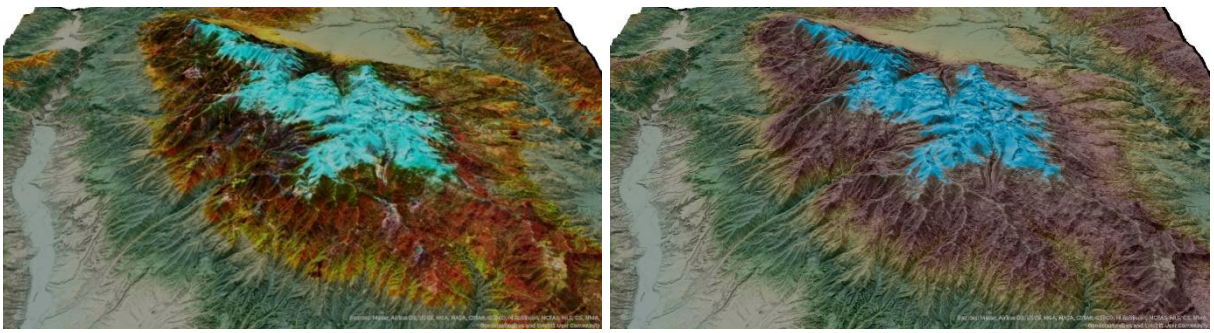


Фиг. 3. 3D карти на псевдо-композитно изображение от Landsat 8, в комбинация на каналите 7-5-3 и векторна снежна „маска“ за месец април 2015 г.

На фиг. 4 и фиг. 5 са представени карти на обработено псевдокомпозитно изображение на Sentinel-2 MSI, генерирано от GEE, в комбинация на каналите 11-8-3 и снежна „маска“, където е визуализирано пространственото разпределение на снежната покривка за април 2025 г. Индивудалната прагова стойност на NDSI, която е определена при извършването на рекласификация на пъвичните стойности генерирани от индекса е 0,47, площта на снежната покривка възлиза на 182,46 км^2 като нейната граница по надморска височина започва приблизително от 2000 m. При сравнение на данните получени за последната темпорална точка – 2025 и тези от 2015, площта на снежната покривка е намаляла приблизително на половина спрямо 2015, съответно с 160,45 км^2, а нейната граница по надморска височина се е изместила приблизително с 500 m.



Фиг. 4. Карта на псевдо-композитно изображение от Sentinel-2, в комбинация на каналите 11-8-3 и векторна снежна „маска“ за месец април 2025 г.



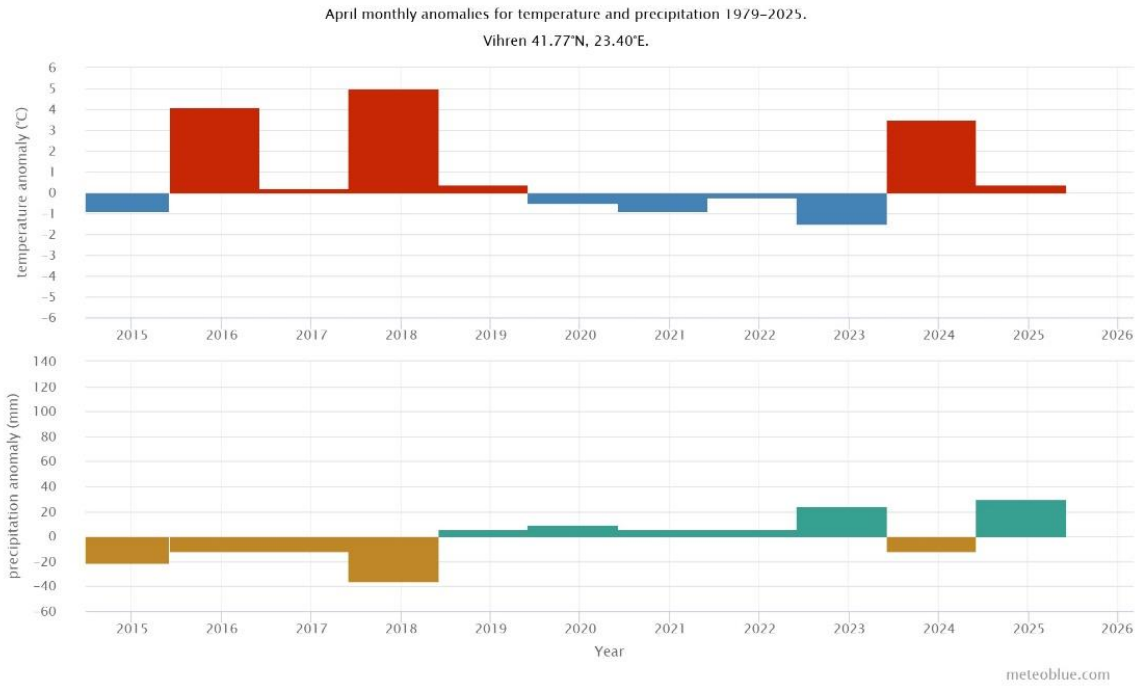
Фиг. 5. 3D Карта на псевдо-композитно изображение от Sentinel-2, в комбинация на каналите 11-8-3 и векторна снежна „маска“ за месец април 2025 г.

На табл.1 са представени всички резултати получени от извършения мониторинг за целия изследван период, включващи използваните прагови стойности на NDSI, изчислените площи заети от сняг и техните граници по надморска височина. На фиг. 6 е представена графика с площите заети от сняг (табл. 1) през изследвания период, която показва тренда и динамиката на простаранственото разпределение на снежната покривка. Данните показват най-ниска стойност за 2024 г., съответно – 174,53 km^2, което съставлява приблизително половината площ заета от сняг в сравнение с тази от 2015 г. и изместване (изкачване) на долната граница на снежната покривка до 2100 m, което възлиза на 600 m изменение спрямо границата от 2015 г.

Табл. 1. Площи заети със снежна покривка, прагови стойности на NDSI и граници във височина

Година (м. април)	**Спътник, сензор**	Прагови стойности на **NDSI**	Площи със снежна покривка (km^2)	Граница надморска височина (m)
2015	Landsat 8 OLI-TIRS	**0,58**	**342,01**	1500
2016	Sentinel-2 MSI	**0,50**	**216**	1900
2017	Sentinel-2 MSI	**0,55**	**284,64**	1800
2018	Sentinel-2 MSI	**0,40**	**214,67**	1800
2019	Sentinel-2 MSI	**0,47**	**224,61**	1750
2020	Sentinel-2 MSI	**0,69**	**194,4**	1700
2021	Sentinel-2 MSI	**0,64**	**209,82**	1950
2022	Sentinel-2 MSI	**0,34**	**232,52**	1900
2023	Sentinel-2 MSI	**0,36**	**183,55**	1900
2024	Sentinel-2 MSI	**0,53**	**174,53**	2100
2025	Sentinel-2 MSI	**0,47**	**182,46**	2000

Фиг. 6. Графика на динамиката на снежната покривка за изследвания период 2015–2025 г.



Фиг. 7. Графика на температурните и валежни аномалии за период 2015–2025 г. според Meteoblue [10]

Първите по-ниски стойности от целия период са регистрирани за годините 2016, 2018 и 2020, като от 2023 до 2025 се запазва негативната тенденция към количественото намаляване на площите заети от сняг. От климатичните данни на фиг. 7, представляващи регистрираните температурни и валежни аномалии от вр. Вихрен, Пирин планина за периода 2015–2025 се наблюдават високи температурни аномалии с 4 ^{o}C до 5 ^{o}C за годините 2016, 2018 и 2024, които съответстват на регистрираните площи с ниски стойности за годините 2016, 2018 и 2024 (Табл. 1, Фиг. 6).

Заключение

На база получените резултати от приложената методика за мониторинг на снежната покривка от Пирин планина, за избрания времеви период се наблюдава негативна тенденция в нейното териториално разпределение като средния тренд на намаление на площите заети от сняг възлизат на приблизително 100 km^2, а изместването на долната граница по надморска височина възлиза на приблизително 500 m.

Благодарности:

Проведеното изследване и получените резултати са финансирани от проект по договор КП-06-М64/1 с фонд „Научни изследвания“ към Министерството на образованието и науката, на тема: „Мониторинг на сезонната динамика и устойчивост на снежната покривка в планинския пояс от територията на Р. България за период от 10 години (2014–2024) на база Дистанционни изследвания“ от 15.12.2022 г.

Литература:

1. https://unric.org/en/climate-europe-warming-faster-than-rest-of-world-ipcc/
2. Велев, Ст. „Климатът на България“. София, Народна просвета, 1990
3. https://dataspace.copernicus.eu/
4. https://code.earthengine.google.com/
5. 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
6. Yin, D., Cao, X., Chen, X., Shao, Y., and Chen, J., “Comparison of automatic thresholding methods for snow-cover mapping using Landsat TM imagery” International Journal of Remote Sensing, 34:19, 6529-6538, 2013
7. https://viirsland.gsfc.nasa.gov./PDF/VIIRS_snow_cover_ATBD_2015.pdf
8. https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/change/vihren_bulgaria_725894?month=4

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

REMOTE SENSING MONITORING OF WATERMELON UNDER DIFFERENT WATER REGIMES: METHODOLOGY AND PRELIMINARY RESULTS

Ilina Kamenova[1], Petar Dimitrov[1], Rositsa Cholakova[2], Lachezar Filchev[1], Ivanka Tringovska[2], Daniela Ganeva[2], Stanislava Grozeva[2]

[1]Space research and technology institute – Bulgarian academy of sciences
[2]Maritsa Vegetable Crops Research Institute – Bulgarian Agricultural Academy
e-mail: ilina.kamenova@space.bas.bg

Key words: *Remote sensing, UAV, watermelon growth monitoring, field sampling*

Abstract: *This study explores the use of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing to monitor watermelon growth under different irrigation regimes. Field experiments were carried out at the Maritsa Vegetable Crops Research Institute (Bulgaria) across three campaigns during the growing season. The test field included two water regimes (optimal and reduced) applied to three watermelon cultivars. A total of 21 plots were monitored (12 under optimal irrigation and 9 under reduced irrigation). UAV flights were conducted with a DJI Phantom at 30 m altitude, providing very high spatial resolution imagery. Ground data were collected for leaf area index (LAI), fraction of intercepted photosynthetically active radiation (fIPAR), fractional vegetation cover (fCover), and chlorophyll content index (CCI). Preliminary analysis indicates that UAV-based observations can detect differences between irrigation treatments. These results demonstrate the potential of remote sensing for crop monitoring and precision irrigation management in vegetable production.*

ДИСТАНЦИОННО НАБЛЮДЕНИЕ НА ДИНЯ ПРИ РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ НА НАПОЯВАНЕ: МЕТОДОЛОГИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Илина Каменова[1], Петър Димитров[1], Росица Чолакова[2], Лъчезар Филчев[1], Иванка Тринговска[2], Даниела Ганева[2], Станислава Грозева[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Институт по зеленчукови култури „Марица“ – Селскостопанска академия
e-mail: ilina.kamenova@space.bas.bg

Ключови думи: *Дистанционни изследвания, БЛС, мониторинг на диня, наземни данни*

Резюме: *Настоящото изследване представя използването на дистанционно наблюдение с безпилотна летателна система (БЛС) за мониторинг на развитието на диня при различни режими на напояване. Полевите експерименти са проведени в Института по зеленчукови култури „Марица“ (България) в рамките на три кампании през вегетационния сезон. Изпитването включва два водни режима – оптимален и редуциран, приложени върху три сорта диня в общо 21 площадки. Полетите с дрон DJI Phantom на височина 30 m осигуряват изображения с много висока пространствена резолюция. Събраните данни включват индекс на листна площ (LAI), дял на задържаната фотосинтетично активна радиация (fIPAR), проективно площно покритие (fCover) и индекс на съдържание на хлорофил (CCI). Предварителните резултати показват, че БЛС-наблюденията успешно разграничават ефектите от различните водни режими и потвърждават потенциала на дистанционното наблюдение за прецизно управление на напояването в зеленчуковото производство.*

Introduction

Precision agriculture has transformed crop management by integrating advanced sensing technologies to optimize inputs and improve productivity. Among these, unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with remote sensing capabilities have become indispensable tools for monitoring crop health, growth dynamics, and water stress. Their ability to capture high-resolution spatial and temporal data makes them particularly valuable for site-specific management in diverse agricultural systems (Li et al., 2015). Modern UAV platforms, such as the DJI Phantom 4 Multispectral, incorporate

multispectral sensors that capture reflectance data across visible, red-edge, and near-infrared bands. These sensors enable the calculation of vegetation indices like NDVI and EVI, which are strongly correlated with crop biophysical parameters such as biomass, chlorophyll content, and canopy structure (Cubero-Castan et al., 2018).

The integration of these indices into monitoring workflows allows for timely detection of crop stress and supports precision interventions. Accurate estimation of biophysical parameters particularly Leaf Area Index (LAI), fraction of intercepted Photosynthetically Active Radiation (fIPAR), and fractional vegetation cover (fCover) is essential for assessing crop development and photosynthetic efficiency. Ground-based instruments like the AccuPAR LP-80 ceptometer offer non-destructive LAI measurements by quantifying PAR transmission through plant canopies (Decagon Devices, 2013). These measurements are validated through canopy radiation transfer models and have shown strong agreement with destructive sampling methods under controlled conditions (Campbell and Norman, 1998).

Water stress detection is a critical application of UAV remote sensing, especially in regions facing water scarcity. Thermal and multispectral imaging systems mounted on UAVs can detect early signs of water stress before visible symptoms emerge, enabling proactive irrigation scheduling. When combined with vegetation indices, thermal data enhances the understanding of plant water status and supports efficient water resource management (Li et al., 2015).

This study investigates the potential of UAV-based multispectral remote sensing for monitoring watermelon growth under varying irrigation regimes. By integrating high-resolution imagery with ground-based biophysical measurements, the research aims to establish robust relationships between vegetation indices and crop parameters. The ultimate goal is to support precision irrigation strategies tailored to horticultural crop production. The present report focuses on describing the methodology for field data collection and UAV image acquisition, as well as presenting preliminary results from the initial monitoring campaigns.

Materials and methods

Study area

The field experiment was conducted during one agricultural year, within the spring–summer growing season of 2025. The field experiment was carried out at a test field managed by “Maritsa Vegetable Crops Research Institute” (Plovdiv, Bulgaria). The field is located at 42.1772° N, 24.1771° E (Fig. 1). The objective of the experiment was to monitor crop parameters of watermelon under two irrigation regimes—optimal and drought-stressed conditions: 100% optimum and 50% reduced irrigation, where the reduced treatment received half the amount of water supplied to the control plots. Irrigation was performed based on soil moisture data measured by ONDO Smart Farming sensors. The studied crop was watermelon (*Citrullus lanatus*), comprising three cultivars: Youlie, NUN 21613, and NUN 22227. For each cultivar, four replications (rows) were planted under the optimal irrigation regime, and one replication (row) under the reduced irrigation regime (Table 1). Each row contained approximately 32 plants.

For the purposes of this study, field sampling was carried out during three field campaigns, conducted on June 6, July 7, and August 8, 2025. These dates correspond to key phenological stages of watermelon development: flower bud formation, fruit development, and fruit ripening (Fig 2). Sampling was performed on test plots (Fig. 1). The selection of sampling points was based on a randomized design. Under the optimal irrigation regime, where three cultivars were planted in four replications (12 rows in total), one sampling point per row was randomly selected using software-based randomization. Under the reduced irrigation regime, three sampling points per replication (row) were randomly chosen, totaling 9 points. Thus, during each field campaign, data were collected from 21 sampling locations. The sampling points were marked with a wooden stick; the coordinates were measured with RTK GNSS.

Field data

fIPAR, LAI, and fCover measurements

The AccuPAR LP-80 ceptometer (METER Group, Inc., Pullman, WA, USA; formerly Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) was used to measure the Leaf Area Index (LAI), the fraction of Intercepted Photosynthetically Active Radiation (fIPAR), and the Vegetation cover fraction (fCover). The AccuPAR LP-80 is designed to measure the Photosynthetically Active Radiation (PAR; 400-–700 nm waveband) under plant canopies and has an 86.5 cm-long probe containing 80 independent sensors, spaced 1 cm apart (Decagon Devices, 2013). The instrument is used to take above and below canopy PAR readings from which it calculates Tau, τ, the ratio of below canopy PAR

measurements to the above canopy PAR. In each sampling plot (point) one above canopy reading and ten below canopy readings were taken and averaged. The below canopy readings were taken by placing the probe perpendicular to the row direction, with the middle of the probe coinciding with the middle of the row width. Five measurements were taken to the left and right of the wooden stick spaced 10 cm apart resulting in a sampled area of approximately 100 cm by 80 cm.

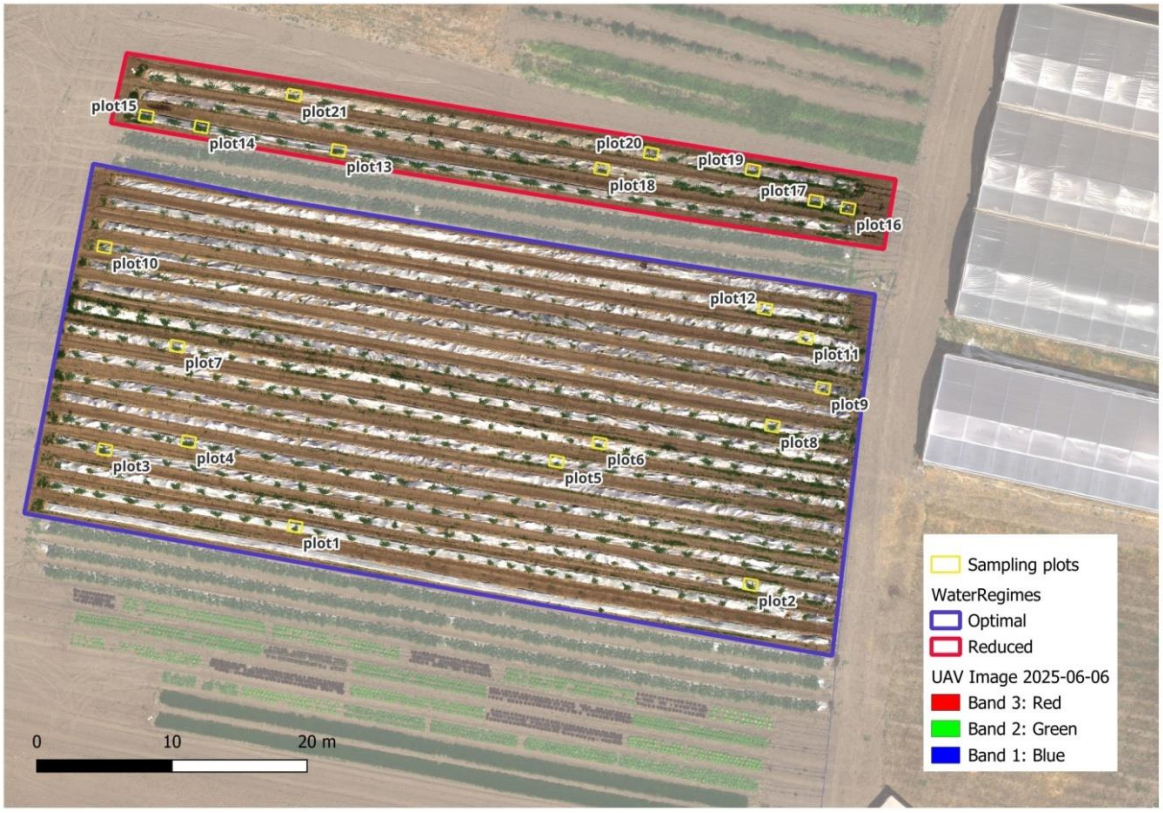


Fig. 1. Study area

Table 1. Field experimental design with irrigation regimes and varieties

Optimal regime																Reduced regime:				
Other crops	Other crops	Other crops		1| Watermelon - Youlie	2| Watermelon - Youlie	3| Watermelon - Youlie	4| Watermelon - Youlie		5| Watermelon - NUN21613	6| Watermelon - NUN21613	7| Watermelon - NUN21613	8| Watermelon - NUN21613		9| Watermelon - NUN22227	10| Watermelon - NUN22227	11| Watermelon - NUN22227	12| Watermelon - NUN22227		Other crops	Other crops	13| Watermelon - Youlie	14| Watermelon - NUN21613	15| Watermelon - NUN22227

Field campaign June
06/06/2025

Field campaign July
07/07/2025

Field campaign August
08/08/2025

Fig. 2. Photos of field test plots with Watermelon, variety Youlie

The fIPAR was calculated as one minus τ. The LAI is calculated by AccuPAR LP-80 by inversion of a model of radiation transmission and scattering within the canopy (Decagon Devices, 2013). It uses τ, the leaf angle distribution parameter Chi, χ, and parameters related to the sun illumination conditions (e.g. zenith angle, θ) to make internally these calculations (Decagon Devices, 2013). The user is required to set Chi, χ, in this case it was set to 3.00, a value suggested for a crop with a strongly horizontal leaf distribution (Decagon Devices, 2013; Campbell and Norman, 1998) as exact values for watermelon were not available in the known literature. The fCover is defined as the vertical projection area of aboveground vegetation elements per unit horizontal ground surface area (Li et al., 2023). It was calculated in a spreadsheet using the Tau readings and equations suggested in the AccuPAR LP-80 operator's manual (Decagon Devices, 2013):

$$fCover = 1 - \tau(\theta_0) \qquad \tau(\theta_0) = \tau(\theta_m)^p \qquad p = \left(\frac{\chi^2}{\chi^2 + (tan\theta_m)^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

where θ_m is the actual sun zenith angle (in radians) during the measurement, $\tau(\theta_m)$ is the measured Tau, $\tau(\theta_0)$ is the predicted Tau for a sun zenith angle of zero, i.e. nadir (θ_0), and χ was defined above.

Chlorophyll content

The Chlorophyll Content Index (CCI) was measured using a CCM-200 chlorophyll meter (Opti-Sciences, USA). The device estimates relative chlorophyll content non-destructively by measuring leaf transmittance at two wavelengths: 653 nm (red) and 931 nm (near-infrared). The ratio of these signals provides a unitless CCI value, where higher readings indicate greater chlorophyll content. This method allows rapid, in-field assessment of leaf greenness and photosynthetic potential without the need for chemical extraction or sample destruction. On each sampling plot are sampled 5 positions and the data is averaged for further analysis

UAV Data

The test field was imaged with a Phantom 4 Multispectral quadcopter (hereinafter "P4") (SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, PR China). It has a multispectral camera with five bands: Near-Infrared (NIR, 840 nm ± 26 nm), Red Edge (RE, 730 nm ± 16 nm), Red (R, 650 nm ± 16 nm), Green (G, 560 nm ± 16 nm), and Blue (B, 450 nm ± 16 nm), as well as an integrated spectral sunlight sensor on top of the drone, which measured the sky down-welling irradiance in the same wavelengths (https://ag.dji.com/p4-multispectral, assessed 2025-10-03). The data recorded by the sunlight sensor during the flight and stored in the header of each *.TIFF image was used to retrieve the reflectance factors during post-processing. Therefore, a work flow without reference radiometric targets was used (Cubero-Castan et al. 2018). Automated missions were planned and executed using the DJI's GS PRO mobile application with the following parameters: 30 m height, 1.6 cm resolution, 80% front overlap, and 60% side overlap. The missions were executed under clear sky conditions between 11:47 and 12:47 local time. Four targets were fixed on the soil surface in the four corners of the experimental field to serve as Ground Control Points (GCPs). They were made of 30 cm by 30 cm white PVC panels on the surface of which a 2x2 checkerboard pattern was created using black self-adhesive foil. The GCPs coordinates were measured with GNSS equipment Leica GS08 in RTK mode achieving an accuracy of 2–3 cm. The images were processed using the photogrammetric software Pix4Dmapper (https://pix4d.com, assessed 2025-10-03) to generate a georeferenced radiometrically calibrated orthophoto mosaic.

Results and discussion

The field data reveal seasonal trends in canopy development (Tab. 2). LAI, FIPAR, and fCover all increased sharply from early June to early July, indicating crop growth and maximum canopy density during mid-summer. By August, values of these variables slightly declined, reflecting the senescence or reduced productivity. Chlorophyll content (CCI) followed an opposite pattern, peaking in early June and gradually decreasing, consistent with pigment degradation later in the season. The data show distinct differences in distribution across the field campaigns. Early-season measurements display low mean values and small variability, indicating a relatively uniform canopy. In contrast, July exhibits the highest averages and distributions for LAI, FIPAR, and fCover, reflecting heterogeneous canopy across plots. By August, the mean values decline, while variability remains moderate, suggesting uneven senescence. Chlorophyll content shows a wider spread in later campaigns, indicating differing pigment rates. Overall, the data distributions suggest progressive development followed by partial decline. The dataset as a whole shows bimodal distributions across the variables.

Table 2. Field data statistics

LAI				
	Max	Min	Standart deviation	Average
06-06-25	0.55	0.04	0.136	0.281
07-07-25	2.98	1.49	0.47	2.34
08-08-25	2.49	0	0.44	1.71
All	2.98	0	0.91	1.42
CCI				
06-06-25	64.8	48	6.1	56.6
07-07-25	52.8	27.9	7.4	41.1
08-08-25	39.2	0	12.2	23.7
All	64.8	0	14.3	34.7
FIPAR				
06-06-25	0.24	0.03	0.055	0.143
07-07-25	0.88	0.59	0.09	0.77
08-08-25	0.83	0	0.1	0.68
All	0.88	0	0.34	0.46
fCover				
06-06-25	0.23	0.03	0.054	0.14
07-07-25	0.87	0.57	0.09	0.75
08-08-25	0.81	0	0.1	0.66
All	0.87	0	0.334	0.47

On Figure 3 are depicted the relationships between NDVI and the investigated canopy biophysical variables (LAI, Chlorophyll, FIPAR, FCover). The NDVI–LAI relationship follows a strong exponential trend, where LAI increases rapidly with NDVI during canopy development and then saturates at higher NDVI values. This behavior is typical of dense vegetation, as NDVI becomes less sensitive once the canopy closes. In contrast, the NDVI–CCI (chlorophyll content index) relationship is weaker and more scattered. Both FIPAR and fCover show tight positive relationships with NDVI, suggesting that NDVI is a reliable indicator of canopy structural properties.

The plots in Figure 4 show the effect of the irrigation regime on LAI and NDVI. They review a complex pattern that depends on the development of the crop. During the initial stages of development, in June, plants under reduced irrigation regime show higher LAI and NDVI than those under optimal irrigation. This contradicts the general expectation that optimal irrigation will provide stronger growth and more biomass. It is clear that this is not necessary in the early season, probably because reduced irrigation is compensated by spring rainfall. During the middle of the growing season, in July, plants under optimal regime overtake those under reduced regime and have higher LAI and NDVI. After the onset of senescence, in August, the reduced irrigation regime shows a stronger scatter in the data; while the optimal regime has an LAI around 1.5 to 2.0, the LAI under reduced regime varies mostly between 0 and 2.0. This indicates that senescence has started earlier under reduced irrigation.

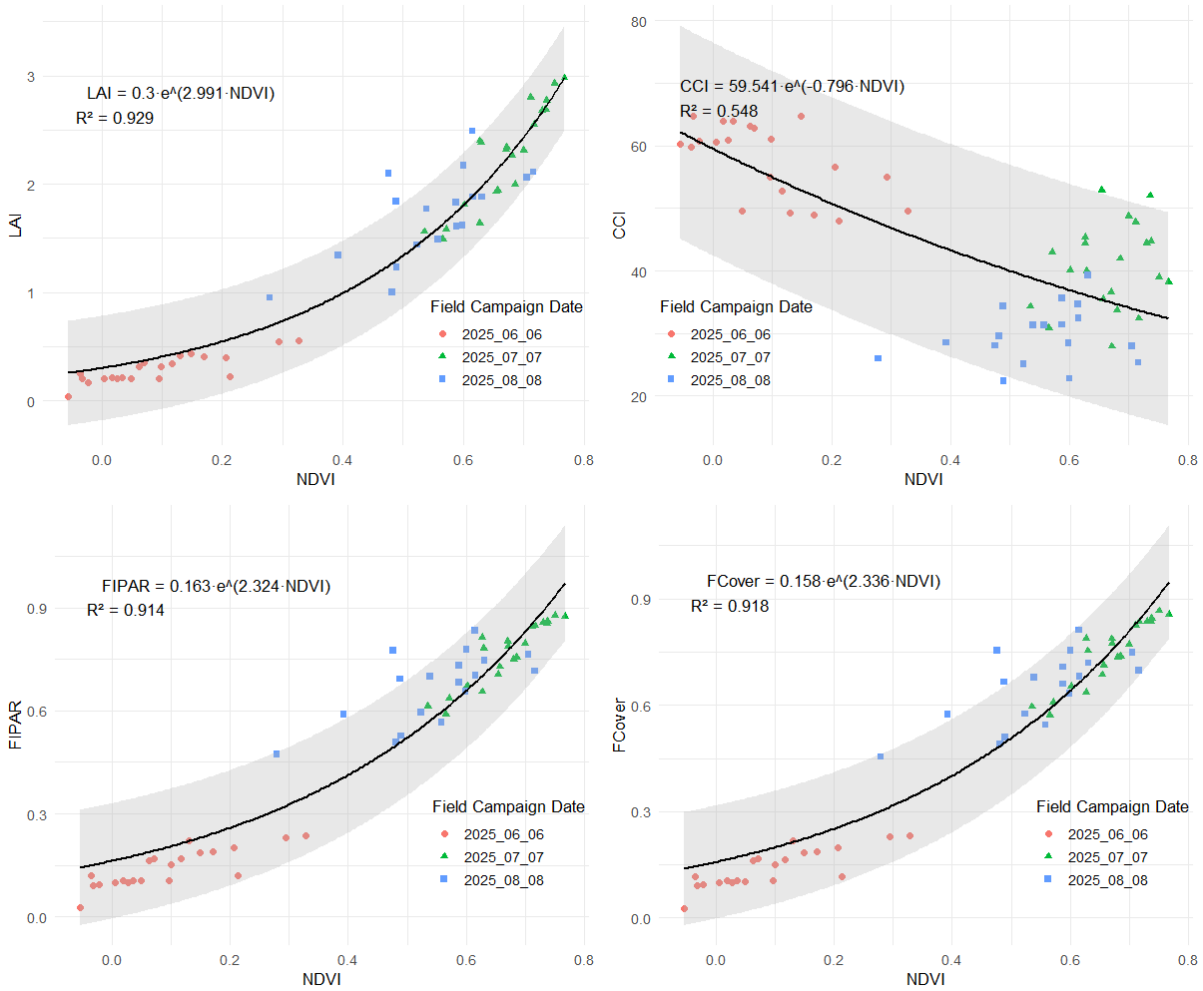


Fig. 3. Relationships between NDVI and canopy biophysical variables (LAI, CCI, FIPAR, FCover)

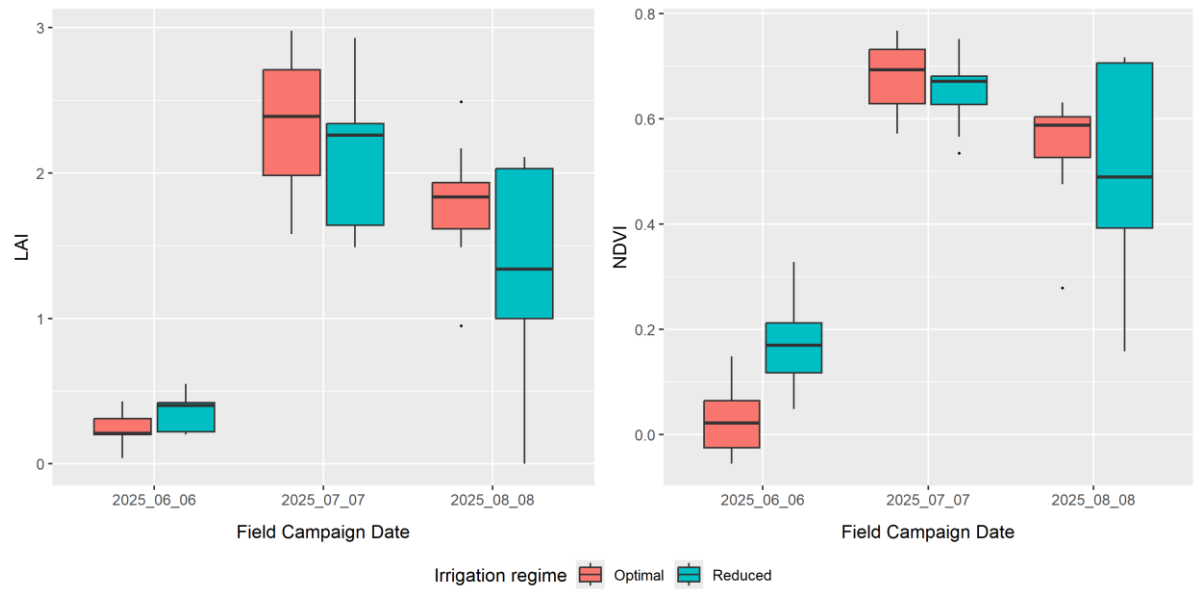


Fig. 4. Distribution of LAI and NDVI, depending on irrigation regime

Conclusions

This paper describes methods used to collect field and drone data on a watermelon experimental field to build models of various crop parameters. In this regard, two aspects were important: 1) precise geolocation of drone images and field sampling locations and 2) a sampling protocol suitable for row crops. Accuracy of up to 2-3 cm was achieved thanks to RTK GNSS. The sampling protocol defines a plot as a rectangle measuring 80 cm x 100 cm, covering a section of a row. The approach allowed the extraction of spectral data from the image from exactly the same area where field measurements were made. Preliminary results show that NDVI responds to LAI, fIPAR, fCover, and CCI of watermelon, with a strong exponential relationship observed for the first three parameters and a weaker, probably linear, relationship for the latter. An effect of the irrigation regime on LAI and NDVI was also observed. In conclusion, the preliminary results review the large potential of UAV-based multispectral observations for monitoring in horticulture. Further studies will model the relationships between the four crop parameters and the spectral data, experimenting with other vegetation indices and different regression methods.

Acknowledgements:

The authors would like to thank the Bulgarian National Science Fund (BNSF). The experiment is funded under the program for national co-financing of COST projects, with the topic: "Monitoring of vegetable crops in support of precision agriculture with satellite and unmanned aerial systems.; No. BG-175467353-2025-01" („Мониторинг на зеленчукови култури в подкрепа на прецизното земеделие със спътникови и безпилотни летателни системи; № BG-175467353-2025-01").

References:

1. Campbell, G. S., and Norman, J. M. (1998). An Introduction to Environmental Biophysics. Springer-Verlag, New York.
2. Cubero-Castan, M., Schneider-Zapp, K., Bellomo, M., Shi, D., Rehak, M., & Strecha, C. (2018). Assessment of the radiometric accuracy in a target-less workflow using Pix4D software. ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 42(2), 251–256. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-251-2018
3. Decagon Devices. (2013). AccuPAR LP-80 PAR/LAI Ceptometer Operator's Manual. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA. PDF
4. Li, W., Weiss, M., Waldner, F., Defourny, P., Demarez, V., Morin, D., Hagolle, O., & Baret, F. (2015). A generic algorithm to estimate LAI, FAPAR and FCOVER variables from SPOT4_HRVIR and Landsat sensors: Evaluation of the consistency and comparison with ground measurements. Remote Sensing, 7(11), 15494–15516. https://doi.org/10.3390/rs71115494
5. Li, L., X. Mu, H. Jiang, F. Chianucci, R. Hu, W. Song, J. Qi, S. Liu, J. Zhou, L. Chen, H. Huang, G. Yan. (2023). Review of ground and aerial methods for vegetation cover fraction (fCover) and related quantities estimation: definitions, advances, challenges, and future perspectives. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 199, 133–156, doi:10.1016/j.isprsjprs.2023.03.020

SPATIAL TECHNOLOGIES IN ARCHAEOLOGY: FROM GIS MAPPING TO SFM-BASED MODELLING

Petru Ciocani[1], Milen Chanev[1], Pavel Popov[2], Iskren Ivanov[1], Lachezar Filchev[1]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Regional Historical Museum – Pleven, Bulgaria
e-mail: p.ciocani@space.bas.bg; mchanev@space.bas.bg

Keywords: *GIS, UAV, SfM photogrammetry, digital documentation, field archaeology*

Abstract: *The development of Geographic Information Systems (GIS) has profoundly transformed archaeological research by enabling precise spatial data acquisition, long-term storage, and advanced analysis. Initially emerging in the 1960s for land-use and urban planning, GIS has evolved into a multidimensional analytical platform supporting complex modelling, pattern recognition, and sophisticated visualisation. In archaeology, GIS facilitates rapid and accurate digital documentation in the field, particularly when integrated with complementary technologies such as UAVs, GPS, and Structure from Motion photogrammetry, as well as the execution of intricate spatial analyses. This paper illustrates its field applications through two case studies: a UAV-based aerial survey around Varbitsa, Bulgaria (2022–2024), investigating the topography of three newly discovered sites, and the use of GIS and SfM modeling during rescue excavations at Schwäbisch Hall-Hessental, Germany (2022–2023), enabling precise documentation of a Middle Neolithic long house. In both cases, GIS supported accurate mapping and the integration of heterogeneous datasets, enhancing interpretative potential. These examples demonstrate that GIS functions not merely as a mapping tool but as a comprehensive platform for archaeological documentation and analysis, which enhances the interpretation of archaeological contexts and ultimately our understanding of past societies.*

ПРОСТРАНСТВЕНИ ТЕХНОЛОГИИ В АРХЕОЛОГИЯТА: ОТ ГИС-КАРТОГРАФИРАНЕ ДО SFM-МОДЕЛИРАНЕ

Петру Чокани[1], Милен Чанев[1], Павел Попов[2], Искрен Иванов[1], Лъчезар Филчев[1]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Регионален исторически музей – Плевен, България
e-mail: p.ciocani@space.bas.bg; mchanev@space.bas.bg

Ключови думи: *ГИС, БЛА, SfM фотограметрия, дигитална документация, теренна археология*

Резюме: *Развитието на Географските информационни системи (ГИС) коренно промени археологическите изследвания, като позволи прецизно събиране, дългосрочно съхранение и комплексен анализ на пространствени данни. Първоначално възникнали през 60-те години на XX век с цел управление на земеползването и градоустройството, ГИС се развиха в многоизмерна аналитична платформа, която поддържа комплексно моделиране, разпознаване на закономерности и усъвършенствана визуализация. В археологията ГИС улеснява бързото и точно цифрово документиране на терена, особено когато е интегрирана с допълнителни технологии като безпилотни летателни апарати (БЛА), GPS и Structure from Motion (SfM) фотограметрия, както и при извършването на сложни пространствени анализи. Настоящата статия илюстрира приложенията на ГИС на терен чрез два казуса: въздушно заснемане с БЛА в околността на село Върбица, България (2022–2024), изследващо топографията на три новооткрити обекта, и прилагането на ГИС и SfM моделиране по време на спасителни разкопки в Швебиш Хал-Хесентал, Германия (2022–2023), което позволи прецизна документация на една дълга къща от средния неолит. И в двата случая ГИС подпомага точното картографиране и интегрирането на хетерогенни набори от данни, повишавайки интерпретативния потенциал. Тези примери показват, че ГИС функционира не просто като инструмент за картографиране, но и като всеобхватна платформа за археологическа документация и анализ, която подобрява интерпретацията на археологическите контексти и в крайна сметка нашето разбиране за обществата от миналото.*

The conceptual foundations of GIS were established almost simultaneously in the 1960s, when geographers in Canada and the United States began developing computational tools to assist land-use management and urban planning [1–3]. These early initiatives laid the groundwork for digital mapping and spatial analysis. Prior to GIS, these were manual, time-consuming, and limited in their capacity to integrate diverse datasets. Early GIS overcame these limitations by enabling the digitisation and basic manipulation of geographic information, which allowed the production of simple thematic maps and established GIS as a tool for large-scale environmental and land resource management. The introduction of this technology marked a profound shift in the ways spatial data could be collected, stored, analysed and displayed. Over subsequent decades, as computational capacity and software sophistication increased, GIS evolved into a multidimensional analytical platform capable of complex spatial modelling, pattern recognition, predictive analyses, derived statistics, and advanced visualisation of spatial relationships, fundamentally transforming the field of geospatial research [4, 5].

These advancements in GIS facilitated its rapid expansion into a wide range of disciplines, including environmental and resource management, transportation and infrastructure, public health, as well as tourism and cultural heritage, where the ability to analyse and visualise spatial patterns offered new insights and improved planning and management [6].

One of the fields that has particularly benefited from GIS is archaeology. GIS was first adopted in archaeology in the 1980s, primarily for site location analysis, predictive modelling, and the study of settlement patterns. Its use expanded during the 1990s as advances in computing power and the increasing availability of software enabled archaeologists to apply GIS more broadly in spatial analysis, landscape archaeology, and cultural resource management. By the 2000s, GIS had become an essential tool in archaeological research, often integrated with complementary technologies such as remote sensing, GPS, and LiDAR, thereby facilitating more sophisticated analyses [7–9, 11].

In recent decades, the introduction of open-source GIS software (including Web GIS), combined with the increasing affordability of Differential Global Positioning System (DGPS) receivers, total stations, digital single-lens reflex (DSLR) cameras, computers, unmanned aerial vehicles (UAVs), as well as the improved accessibility of satellite imagery, has rendered GIS a cost-effective and indispensable tool in archaeology [10–12].

Within archaeological fieldwork, GIS has become an indispensable instrument for spatial data acquisition. It enables archaeologists to record locations with exceptional precision and efficiency, while simultaneously allowing rapid mapping and analysis, thereby substantially enhancing both field documentation and subsequent post-excavation research [11–13].

A principal field application of GIS involves the systematic recording, storage and manipulation of spatial information during surface surveys and excavation campaigns. Archaeological data acquired with instruments such as GPS units and total stations are seamlessly integrated into geospatial databases, forming the analytical foundation for subsequent mapping, pattern recognition, and interpretative synthesis [3, 13, 14].

These methods ensure rapid and accurate data capture, while simultaneously allowing the on-site visualisation of basic maps. The recorded data can subsequently be transferred to GIS software, where it can be further processed into detailed distribution maps, analysed for intra-site patterning, and integrated with other spatial datasets [13]. Such analyses are instrumental in delineating the extent of archaeological sites, distinguishing settlement areas across different phases of occupation, and identifying zones of concentrated activity [15, 16]. Furthermore, elevation measurements obtained with the help of DGPS or total stations can be used to construct high-resolution Digital Elevation Models (DEMs), which aid in detecting subtle morphological features such as earthworks or palaeochannels that are often obscured by vegetation [3].

Another major strength of GIS lies in its ability to incorporate heterogeneous spatial datasets, ranging from digitised historical maps and aerial photographs to satellite imagery, geophysical prospection outputs, and LiDAR scans. Through the seamless integration of diverse datasets, GIS facilitates more detailed field documentation and substantially enhances the precision of spatial analysis, thereby facilitating both the discovery of new sites and the investigation of known ones [7, 11, 13, 17].

The rapid development of UAV technology over the past decade rendered aerial photography highly accessible and efficient, enabling its integration into routine archaeological documentation workflows. UAVs facilitate the surveying of extensive areas and the acquisition of data with very high spatial resolution. Beyond single aerial photographs, they also enable the capture of multiple overlapping images that can be processed into large-scale orthophoto maps or digital terrain models. These outputs, once processed, can be seamlessly incorporated into GIS, where they substantially enrich spatial analyses by enhancing site documentation, improving landscape modelling, and supporting comparative investigations across larger regions [18].

A UAV-based aerial photographic survey covering an extensive area around the village of Varbitsa was conducted by Kristian Aleksandrov, Milen Chanev, and Martin Milev in 2022, and subsequently by Martin Milev in 2024. This work was carried out in conjunction with the reconnaissance survey expedition “Plevenski visochini”, directed by Pavel Popov between 2022 and 2023, the results of which have been published elsewhere [19, 20]. During the surface survey, six archaeological sites were identified, three of which were included in the aerial photographic survey, with the aim of studying their topography. The aerial survey was carried out using a DJI Mavic Air 2 UAV equipped with an RGB camera. Flight planning was performed via the DroneLink platform at an altitude of 120 m, with the camera positioned in a nadir orientation. The collected photographs were subsequently processed in Agisoft Metashape 2.2.1 to generate a Digital Elevation Model (DEM).

Fig. 1. Orthophoto of the surroundings of Varbitsa village, Pleven Municipality, encompassing three archaeological sites. The orthophoto is derived from a DEM generated from a UAV-based aerial photographs.

The first site, located approximately 1.6 km northwest of the centre of the modern village, in the area called “Suhata Varbitsa” (Fig. 1-1), constitutes a multi-period settlement encompassing an area of 15 ha. The site was occupied during the Iron Age, Classical Antiquity (Roman period), and the Middle Ages. The DEM shows that the settlement is situated on a gentle, northwest-facing slope descending into the valleys of two springs, both originating within the site’s territory. One of these springs shares its name with the toponym of the area. No distinctive morphological features associated with the settlement are visible in the DEM. The second site, located about 1.1 km NNE of the village centre (Fig. 1-2), is a Late Bronze Age settlement covering an area of 5 ha. Immediately southwest of the settlement lies a funerary tumulus. The DEM displays the settlement on a terrace with a slight northeast exposure, overlooking the valley of a small stream that encircles it on three sides. The settlement area exhibits a slightly darker colouration than the surrounding sediment, which allows its approximate boundaries to be delineated. The third site, located at about 1.4 km ENE of the village centre, in the area called “Listachkata” (Fig. 1-3), constitutes a Late Bronze Age necropolis covering an area of ca. 6 ha. In 2024, a small-scale test excavation was conducted, revealing two graves containing skeletons in a crouched position and one grave with disarticulated remains of four individuals. On the DEM, the site appears to be situated on a gently westward-sloping terrace, with no discernible morphological features.

In addition to the ability to swiftly and precisely collect large numbers of spatial measurements, GIS is of great support for the documentation workflow of archaeological excavations with its ability to integrate photographs of flat surfaces with reference points of known coordinates. These photographs can be transformed into orthophotos through georeferencing and orthorectification, providing scaled images suitable as drawing bases and for photogrammetry [10, 11]. Such orthophotos display the natural texture of archaeological features, obviating the need for conventional coloured drawings, and can be collaged to document large areas or confined spaces. This approach reduces field time, ensures greater accuracy, and allows off-site drawing of plans, profiles, and production of reconstructions [11, 12].

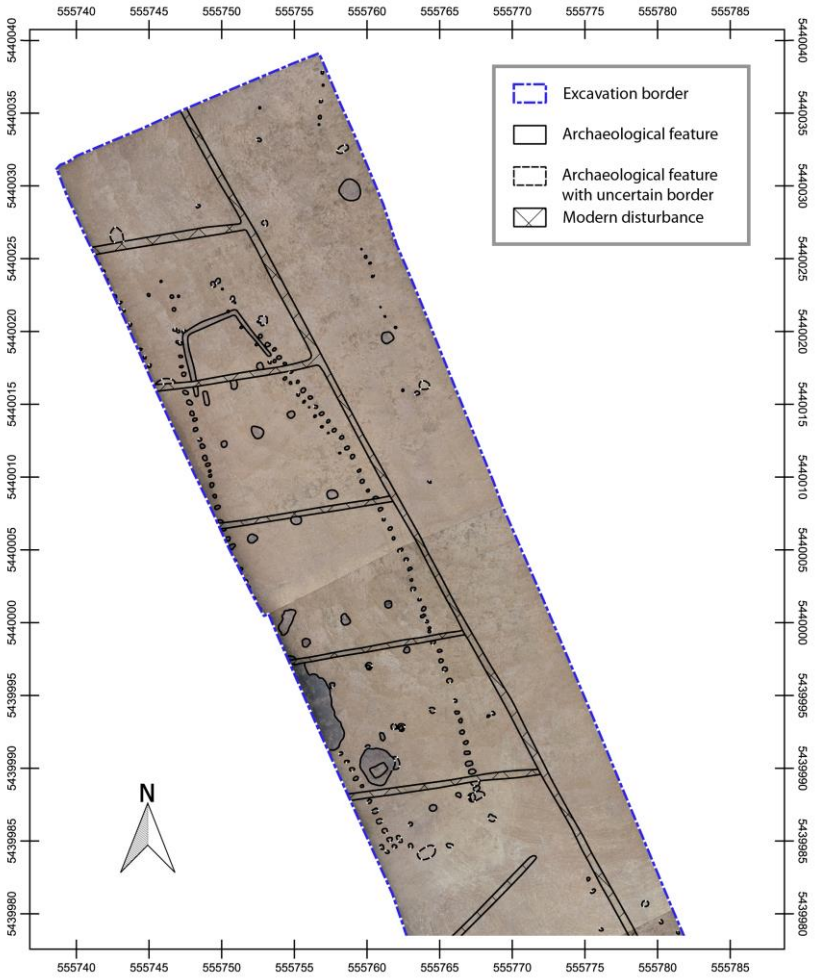


Fig. 2. Plan of a Middle Neolithic house discovered at Schwäbisch Hall-Hessental, Sonnenrein 3 (Germany), compiled from orthophotos extracted from SfM models. Aerial photography by Petru Ciocani; compilation and drawing by Elina Nordwald. Publication rights held by the State Office for Monument Conservation in Baden-Württemberg (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg).

Furthermore, the past decade has witnessed the widespread adoption of Structure from Motion (SfM) photogrammetry, which produces three-dimensional models from overlapping photographs. These 3D models allow the extraction of highly accurate orthophotos, offering superior texture quality compared to collages of orthorectified photographs [11, 12]. SfM has proven particularly valuable in large-scale rescue excavations, where it assists the documentation workflow by enabling the expeditious compilation of planimetric maps and profile drawings. This, in turn, facilitates a comprehensive overview and the monitoring of rapidly evolving field situations, thereby enabling effective planning and enhancement of investigation strategies.

A prime example of the implementation of this documentation technique is provided by the archaeological investigations at Schwäbisch Hall-Hessental, Sonnenrein 3 (Germany), conducted between 2022 and 2023 by the company ArchaeoBW GmbH in collaboration with the State Office for Monument Conservation in Baden-Württemberg (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg [LAD]),[1] leading to the discovery of a previously unknown Middle Neolithic settlement of the Rössen culture [21]. For the documentation of all plans and profiles, SfM models were generated using Agisoft Metashape, on the basis of UAV aerial photographs for the plans and digital single-lens reflex (DSLR) camera photographs for the profiles. Orthophotos extracted from the SfM models were subsequently processed in QGIS for the elaboration of planimetric maps and profile drawings[2].

[1] We wish to express our deep appreciation to Felicitas Schmitt (LAD) and Marcel C. Hagner (ArchaeoBW) for their collaboration and for granting permission to publish the data.
[2] For a detailed description of the profile documentation see [22; 23].

Fig. 3. Profile section of a Middle Neolithic storage pit at Schwäbisch Hall-Hessental, Sonnenrein 3 (Germany), documented by a standard photograph (a.) and an orthophoto extracted from an SfM model (b.). Photography by Katarzyna Szczurek, orthophoto generation and drawing by Elina Nordwald. Publication rights held by the State Office for Monument Conservation in Baden-Württemberg (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg).

As an example of plan documentation, we present the ground plan of a well-preserved Middle Neolithic house situated in the northwestern part of trench 03 (Fig. 2). The building, outlined by rows of postholes, exhibits a distinctly ship-shaped ground plan measuring approximately 41 m in length and 10 m in width. It displays a four-aisled internal arrangement, formed by three longitudinal rows of substantial postholes and two external, curved alignments of smaller postholes that delineate the outer walls. The structure is oriented along a northwest–southeast axis, with the entrance situated at the southeastern end. At the opposite (northwestern) end, a compartment enclosed by three plank-built walls set within a shallow foundation trench formed a separate functional area within the building. This house shows strong analogies with another well-preserved house of the Rössen culture, discovered by Hermann Huber in the 1960s at Schwäbisch Hall-Weckrieden (“Wolfsbühl”), a site located in close proximity to the north [24–25]. For profile documentation, we present the profile section of a roughly circular pit located in the southern part of the aforementioned Middle Neolithic house. The pit cuts through two of the house’s postholes, indicating that it was dug after the abandonment of the house. The pit has a depth of 0.70 m and was filled with ashes and a considerable amount of daub fragments, some of which display two straight surfaces (Fig. 3), representing the remains of a burnt structure, most likely an oven. In the eastern part of the profile, one of the postholes cut by the pit is also visible.

The planimetric maps and profile drawings produced in this way are not only more accurate and faster to produce than conventional millimetre paper- or pantograph-based drawing techniques, but they also allow the original colour of the sediment to be preserved, thus providing a much more realistic image of the archaeological situation.

Taken together, these applications illustrate that GIS functions as a comprehensive analytical platform for the collection, organisation, and analysis of archaeological data rather than a mere cartographic tool for archaeology. Whether employed in surface surveys or stratigraphic excavations, GIS facilitates accurate documentation, enables advanced spatial analyses, and ultimately enhances the interpretive potential of archaeological research.

Moreover, GIS enables archaeologists to analyse sites in their broader spatial context or multiple sites within a region through a variety of spatial methods that were previously difficult or impossible to conduct. Landscape and site distribution analyses allow the understanding of the environments in which sites were located as well as the settlement patterns, facilitating the reconstruction of palaeoenvironments, resource use and socio-economic organisation [3, 11, 13]. Cost distance and site catchment analyses assess accessibility, optimal routes, and the exploitation of

surrounding resources, often taking into account slope, land cover, and obstacles via raster-based cost surfaces. Thiessen polygons provide a complementary method for delineating site territories in extensively surveyed, synchronous regions, while predictive modelling forecasts probable locations of undiscovered sites based on environmental parameters. Viewshed analysis further contributes to understanding visual relationships within landscape, revealing the visibility and intervisibility of past sites, such as settlements and monuments [3, 7, 11, 26]. Together, these GIS-based methods provide archaeologists with powerful tools for spatial analysis, landscape reconstruction, and the interpretation of past human-environment interactions.

Conclusions

The development and integration of GIS have fundamentally transformed both geospatial research and archaeological practice. From its origins in the 1960s as a tool for land-use management and urban planning, GIS has evolved into a versatile platform capable of complex spatial analyses, modelling, and visualisation. Its applications now extend across diverse disciplines, including environmental management, infrastructure planning, public health, tourism, and cultural heritage. In archaeology, GIS has shifted from initial site location and settlement pattern analyses in the 1980s to becoming an essential component of landscape archaeology, cultural resource management, and advanced spatial analyses by the 2000s. Recent technological advances and increased affordability of UAVs, LiDAR, DGPS, and total stations, coupled with development of GIS software and Structure from Motion photogrammetry, have further expanded GIS capabilities, enabling the rapid collection, integration, analysis and visualisation of high-resolution spatial data.

One of the key applications of GIS in archaeology is the precise acquisition and management of spatial data during surveys and excavations supporting the documentation process. Using a DGPS or total stations, archaeologists can accurately record the locations of artefacts and features and subsequently process the data within GIS to generate detailed distribution maps and analyse intra-site patterns. Recent advances in UAV technology have made high-resolution aerial photography increasingly accessible, enabling the production of orthophoto maps and digital terrain models that can be incorporated into GIS, enhancing landscape modelling and topographic analyses on archaeological sites. GIS also plays a crucial role in the documentation workflow of archaeological excavations through its capacity to integrate photographs of flat surfaces with reference points and to transform them into orthophotos. In recent years, the adoption of SfM photogrammetry in archaeology has further advanced documentation practices by enabling the extraction of detailed orthophotos with superior texture quality from high-precision 3D models. The documentation of plans and profiles in this manner is not only considerably faster and more precise than traditional techniques, but also permits preserving the natural texture of the features and facilitates the off-site production of drawings.

Furthermore, GIS facilitates the execution of intricate spatial analyses encompassing a vast number of sites, thereby enabling the reconstruction of palaeoenvironments, the analysis of site catchments and resource use, predictive modelling, and viewshed studies. This, in turn, fosters a comprehensive understanding of both human-environment interactions and socio-cultural dynamics.

Overall, GIS has evolved from a simple mapping tool into a pivotal platform for the acquisition, processing, and interpretation of archaeological data, thereby enhancing both the precision of documentation and the analytical depth of research. By integrating high-resolution datasets with advanced spatial modelling, GIS enables archaeologists to investigate past landscapes and human activities in ways that were previously unattainable. As such, GIS has become an indispensable instrument within contemporary archaeological science.

Acknowledgements:

The authors wish to express their sincere gratitude to the State Office for Monument Conservation in Baden-Württemberg (Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg) and ArchaeoBW GmbH for providing access to the data used in this study. Their support and cooperation were essential for the completion of this research. The article is a result of the implementation of project BG16RFPR002-1.014-0011 Sustainable Development of the Center of Excellence "Heritage BG," funded under the grant aid procedure BG16RFPR002-1.014 "Sustainable Development of Centers of Excellence and Centers of Competence, Including Specific Infrastructures or Their Associations from the National Roadmap for Scientific Infrastructure.

References:

1. Tomlinson, R. F. The Canada Geographic Information System (CGIS): A Retrospective. Ottawa, Natural Resources Canada, 1998
2. Chrisman, N. Charting the Unknown: How Computer Mapping at Harvard Became GIS. Redlands, CA, ESRI Press, 2004
3. Chapman, H. Landscape Archaeology and GIS. Brimscombe, 2006
4. Chrisman, N. R. Exploring Geographic Information Systems (2nd ed.). Chichester, John Wiley & Sons, 2002
5. Goodchild, M. F. "Geographic information systems and science: Today and tomorrow." Annals of GIS, 15 (1), 2009, pp. 3–9. https://doi.org/10.1080/19475680903250715
6. Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind. Geographic Information Systems and Science (2nd ed.). Chichester, Wiley, 2005
7. Maschner, H. D. G. "Geographic Information Systems in Archaeology." In: H. D. G. Maschner (ed.). New Methods, Old Problems: Geographic Information Systems in Modern Archaeological Research. Carbondale, 1996, pp. 1–20
8. Kvamme, K. L. "Recent directions and developments in geographical information systems." Journal of Archaeological Research, 7(2), 1999, pp. 153–201. https://doi.org/10.1023/A:1022399312429
9. Wheatley, D., M. Gillings. Spatial Technology and Archaeology: The Archaeological Applications of GIS. London, Taylor & Francis, 2002
10. Scharl, S., S. Suhrbier. "Uivar – Eine Ausgrabung im rumänischen." In: W. Schier (Hrsg.). Masken Menschen Rituale. Alltag und Kult vor 7000 Jahren in der prähistorischen Siedlung von Uivar, Rumänien. Katalog zur Sonderausstellung, Würzburg, 2005, pp. 31–34
11. Rösch, F. "GIS als Werkzeug archäologischer Grabungsdokumentation – zwei Fallbeispiele aus Sachsen-Anhalt." LSA VERM, 2019, pp. 39–50
12. Schmid, C., R. Krauß. "Methodology of the excavation at Bucova Pusta IV." In: R. Krauß, D. Ciobotaru (eds.). Stone Age without Stones. The Early Neolithic Site of Bucova Pusta IV in Northwestern Banat (Romania). Tübingen, 2024, pp. 75–88
13. Renfrew, C., P. Bahn. Archaeology. Theories, Methods and Practice. Eighth edition. London, 2020 [1991]
14. Kecheva, N. "Established archaeological survey methods revised. Application of new GIS technologies in Bulgaria." In: M. Gurova et al. (eds.). Investigations of the Cultural Heritage: Challenges and Perspectives. Proceedings of the Second Postgraduate Conference, Sofia, 28–29 November 2013. Bulgarian e-Journal of Archaeology, Supplementum 3. Association of Bulgarian Archaeologists & National Institute of Archaeology with Museum – BAS, Sofia, 2014, pp. 1–16
15. Greenfield, H. J., T. Jongsma. "Sedentary pastoral gatherers in the early Neolithic: Architectural, botanical, and zoological evidence for mobile economies from Foeni-Sălaș, south-west Romania." In: D. Bailey et al. (eds.). Living Well Together? Settlement and Materiality in the Neolithic of South-East and Central Europe. Oxford, 2008, pp. 108–130
16. Greenfield, H. J., K. S. Lawson. "Defining activity areas in the Early Neolithic (Starčevo-Criş) of southeastern Europe: A spatial analytic approach with ArcGIS at Foeni-Sălaş (southwest Romania)." Quaternary International, 539, 2020, pp. 4–28. http://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.042
17. Drewett, P. L. Field Archaeology. An Introduction (Vol. 2). London, 2011 [1999]
18. Campana, S. "Drones in archaeology: State of the art and future perspectives." Archaeological Prospection, 24(4), 2017, pp. 275–296. https://doi.org/10.1002/arp.1569
19. Попов, П., Т. Захариева, П. Ангелова. „Археологически паметници в Плевенските Височини: хронология и типология на новорегистрирани археологически обекти в селата Върбица, Буковлък и Опанец, общ. Плевен." В: Д. Петров. Мизия от древността до днес, IV. Регионален исторически музей – Плевен, Плевен, 2024, с. 142–177
20. Popov, P., G. Dzhurkowska. "Late Bronze Age vessel from the village of Varbitsa (Pleven region, Bulgaria)." In: Memoria Antiquitatis Arheologie XL/1. In honorem Dr. Vasile Ursachi. Piatra-Neamţ, 2025, pp. 181–196
21. Chanev, M., P. Ciocani, G. Petrov, P. Popov, G. Jelev, I. Ivanov, Z. Dimitrov, M. Tsvetkova, L. Filchev. "Remote sensing and GIS as non-destructive methods in archaeology." In: A. Christofi et al. (eds.). Proceedings SPIE 13816, Eleventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2025), 138161O (19 September 2025). https://doi.org/10.1117/12.3073139
22. Hagner, M. C., P. Sikora. "The Use of Structure from Motion for the Documentation of Archaeological Profiles. The Introduction of a First Workflow to Creating a Profile Drawing with Agisoft Photoscan Professional, QGIS® and GeoTiffExaminer." 2017. https://www.academia.edu/12557650/ (last access 01.04.2025)
23. Bofinger, J., M. C. Hagner, P. Sikora. "Archäologie am 'Hegelsberg'. Ausgrabungen im zukünftigen Gewerbegebiet in Kircheim unter Teck." In: J. Bofinger (Hrsg.). Steinzeitdorf und Keltengold. Archäologische Entdeckungen zwischen Alb und Neckar. Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, 78. Likias Verlag, 2018, pp. 12–21
24. Huber, H. "Grabungen in der neolithischen Siedlung auf dem "Wolfsbühl" bei Schwäbisch Hall." Fundberichte aus Schwaben, 19, 1971, pp. 28–50
25. Huber, H. "Ein Hausgrundriss der Rössener Kultur in Schwäbisch Hall." Archäologisches Korrespondenzblatt, 2, 1972, pp. 85–88
26. Renfrew, C., P. Bahn. Archaeology. Theories, Methods and Practice. Fourth edition. London, 2004 [1991].

МЕТОДИКА ЗА САТЕЛИТЕН МОНИТОРИНГ НА ИГЛОЛИСТНИ ГОРИ

Михаела Цветкова, Милен Чанев, Александър Гиков, Лъчезар Филчев

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

Ключови думи: *Дистанционни методи, сателитни данни, вегетационни индекси, иглолистни гори, ГИС*

Резюме: *В представената методика за аерокосмически мониторинг на иглолистни гори, е представен метод за комбиниране на данни от таксацията на горски територии със сателитни данни. Методиката включва избрани таксационни показатели като възраст, височина, диаметър, пълнота, бонитет и запас на 1 ha, които се комбинират с избрани вегетационни индекси и биофизични параметри, получени от сателита Satnitinel-2. Получените данни са обработени с ГИС софтуер. За установяване, както и доказване на връзката между наземните и сателитните данни се предлага статистически корелационен анализ между посочените таксационни показатели и генерираните по сателитни данни вегетационни индекси и биофизични параметри. Методологията е приложена и тествана на част от наземен работен аерокосмически полигон Рила.*

METHODOLOGY FOR SATELLITE MONITORING OF CONIFEROUS FORESTS

Mihaela Tsvetkova, Milen Chanev, Aleksander Gikov, Lachezar Filchev

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

Keywords: *Remote sensing methods, satellite data, vegetation indices, coniferous forests, GIS*

Abstract: *This methodology for aerospace monitoring of coniferous forests combines data from forest area taxation with satellite imagery. Taxation indicators such as age, height, diameter, canopy density, site quality, and growing stock per hectare, are used in combination with derived vegetation indices and biophysical parameters derived from Sentinel-2 satellite. The spatial data is processed using GIS software. To confirm and demonstrate the relationship between ground and satellite data, a statistical correlation analysis is conducted between the specified taxation indicators and the vegetation indices and biophysical parameters generated from satellite data. The methodology has been applied and tested within a selected Rila ground-based aerospace polygon.*

Въведение

Иглолистните гори представляват ключов елемент от горските екосистеми в умерения климатичен пояс и имат съществено значение за регулирането на въглеродния баланс, биоразнообразието и устойчивото управление на природните ресурси. В условията на засилващи се климатични промени и антропогенен натиск, необходимостта от ефективни методи за тяхното наблюдение и оценка става все по-актуална [1, 2]. Традиционните теренни инвентаризации, въпреки своята надеждност, са ограничени поради високата си трудоемкост, високи разходи и ограничено пространствено покритие. Това поражда нуждата от прилагането на дистанционни методи и интеграцията им с географски информационни системи (ГИС) за разработване на мащабируеми и икономически ефективни подходи за мониторинг.

През последните години сателитните системи, и по-специално Sentinel-2, се наложиха като надежден източник на мултиспектрални данни с висока пространствена, спектрална и времева резолюция, подходящи за мониторинг на горски екосистеми [3]. Благодарение на своите 13 спектрални канала, Sentinel-2 предоставя възможност за извличане на широк набор

от вегетационни индекси, които отразяват ключови параметри като биомаса, индекс на листна площ (LAI), съдържание на влага и фотосинтетична активност [4, 5].

В комбинация с наземни лесотаксационни данни, тези индекси създават основа за разработване на емпирични и статистически модели за оценка на структурни и биофизични параметри на горите [6].

Методологичните подходи, основани на статистически анализи – включително корелационни и регресионни методи дават възможност за количествено определяне на връзките между спектралните характеристики и таксационните показатели [7, 8]. Допълнителна стойност носи използването на ГИС за пространствено обобщаване на данни по подотдели, което позволява интегриране на хетерогенни информационни източници и подпомага пространствения анализ и моделиране [9, 10].

Цели на изследването

Основната цел на настоящата статия е да представи методика за сателитен мониторинг на иглолистни гори, базирана на интегрирането на мултиспектрални данни от сателита Sentinel-2 с лесотаксационна информация от горска инвентаризация. В рамките на изследването се поставят следните задачи:

1. Да се извлекат и анализират ключови вегетационни индекси и биофизични параметри, чувствителни към състоянието и структурата на иглолистните насаждения.
2. Да се интегрират дистанционни данни с таксационни показатели на ниво подотдел в рамките на наземен работен аерокосмически полигон Рила.

Материали и методи

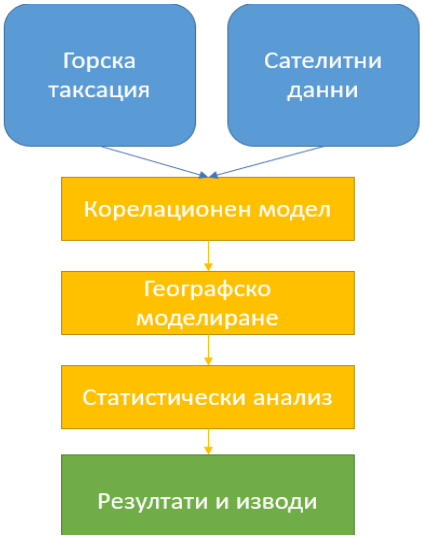
1. Обект на изследване

За целите на настоящото изследване като опитна територия беше част от наземен работен аерокосмически полигон Рила. Той се характеризира с преобладаващи иглолистни насаждения от обикновен смърч (*Picea abies*), които са сред най-старите естествени смърчови гори в Европа. Тези особености превръщат територията в ценен полигон за разработване и тестване на методики за дистанционен мониторинг.

На база предоставените от Дирекцията на НП „Рила“ лесоустройствени проекти и векторни данни бяха идентифицирани 82 подотдела, попадащи в границите на резервата. След първоначален анализ от изследването бяха изключени подотдели, които не са от интерес.

2. Дистанционни данни

Като основен източник на спектрална информация бяха използвани мултиспектрални изображения от Sentinel-2 L2A, осигуряващи 13 спектрални канала с пространствена разделителна способност от 10, 20 и 60 m. Изборът на Sentinel-2 се обосновава с неговата висока спектрална разделителна способност, сравнително висока времева разделителна способност, свободен достъп до данните и доказана ефективност в горски мониторинг [4]. Конкретно, беше изтеглено изображение от 27 август 2017 г. [11], характеризиращо се с ниска облачност (под 20%) [12]. Схема на предложената методика е представена на фигура 1.



Фиг. 1. Схема на методиката за сателитен мониторинг на иглолистни гори

3. Предварителна обработка на изображенията

Обработката включваше няколко стъпки:

1. Преоразмеряване на всички спектрални ленти до 10 m резолюция за осигуряване на пространствена съгласуваност;
2. Извличане на подрегион – ограничаване на сцената до границите на избрани горски пододтдели в рамките на наземен работен аерокосмически полигон Рила, използвайки предоставените векторни данни;
3. Изчисляване на индекси – генериране на 24 спектрални вегетационни индекса и 3 биофизични параметъра представени на Таблица 2 и 3. Индексите бяха изчислени чрез комбинация от син, червен, NIR и SWIR канали, като обхващат различни характеристики на растителността – съдържание на хлорофил (Canopy Chlorophyll Content Index), влага (Normalized Difference Moisture Index), биомаса (Enhanced Vegetation Index, Simple Ratio) и др. [7, 8, 13].

Изчисленията бяха извършени чрез платформата Sentinel Hub EO Browser и растерен калкулатор в средата на QGIS 3.34 [14]. Резултатите бяха експортирани във формат GeoTIFF.

Таблица 1. Биофизични параметри генерирани по данни от спътника Sentinel-2

No	*Bph. Par.*	*Formulae*	*Reference*
1	LAI	SNAP Biophysical Processor	[15]
2	FAPAR		
3	FCover		

Таблица 2. Вегетационни индекси генерирани по данни от спътника Sentinel-2

No	*VIs*	*Formulae*	*Reference*
1	NDVI	(B8 - B4) / (B8 + B4)	[16]
2	NDWI	(B8 - B12) / (B8 + B12)	[17]
3	NDVIG	(B6 - B3) / (B6 + B3)	[18]
4	NMDI	(B8a - (B11 - B12)) / (B8a + (B11 + B12))	[19]
5	OSAVI	(B8 - B4) / (B8 + B4 + 0.16)	[20]
6	DVI	B8 - B4	[21]
7	EVI	2.5 * (B8 - B4) / (B8 + 6 * B4 - 7.5 * B2 + 1)	[7]
8	EVI2	2.5 * (B8 - B4) / (B8 + 2.4 * B4 + 1)	[22]
9	CIrededge	B7 / B5 - 1	[23]
10	TCARI	3 * [(B5 - B4) - 0.2 * (B5 - B3) * (B5 / B4)]	[13]
11	GCVI	B8 / B3 - 1	[23]
12	GNDVI	(B9 - B3) / (B9 + B3)	[24]
13	GDVI	B8 - B3	[23]
14	NDRE1	(B6 - B5) / (B6 + B5)	[25]
15	NDRE2	(B7 - B5) / (B7 + B5)	[25]
16	CCCI	NDRE1 / OSAVI	[26]
17	WDRVI	(0.1 * B9 - B5) / (0.1 * B9 + B5)	[27]
18	NDMI	(B8 – B11) / (B8 + B11)	[28]
19	FCI1	B4*B5	[8]
20	FCI2	B4*B8	[8]
21	GLI	(B3-B4)+(B3-B2)/(2*B3)+B4+B2	[29]
22	SAVI	1.5*(B8-B4)/(B8+B4+0.5)	[30]
23	NDCI	B5-B4/B5+B4	[31]
24	SR	B8/B4	[32]

4. Извличане на стойности по подотдели

С помощта на функцията zonal statistics в ГИС софтуера QGIS за всеки от избраните подотдели се извличат стойности на индексите и биофизичните параметри.

Тези статистики позволяват както оценка на централната тенденция, така и на вътрешната вариабилност на индексираните стойности в рамките на подотделите.

5. Таксационни данни

Интегрираните лесотаксационни показатели включват: възраст, височина, диаметър, пълнота, бонитет, запас на 1 ha и общ запас на подотдела. Те бяха съчетани със спектралните данни в обща база данни.

6. Статистическа обработка

Корелационният анализ беше проведен в MS Excel с използване на коефициента на Пирсон (r) за оценка на линейните зависимости между вегетационните индекси и таксационните параметри. Резултатите бяха визуализирани чрез scatter plot, който представлява графично представяне на връзката между две числови променливи. Тази връзка се илюстрира с точки, като всяка точка представлява конкретна стойност от променливите. Позицията на всяка точка на хоризонталната (ос x) и вертикалната (ос y) ос показва стойностите за конкретна точка от данните. Тези инструменти се използват за разкриване на връзки, тенденции и корелации в данните. Например, те могат да обяснят как промените в една променлива влияят върху друга.

Резултати

1. Общи зависимости

Корелационният анализ между 24-те спектрални вегетационни индекса и 3-те биофизични параметъра от Sentinel-2, от една страна, и лесотаксационните показатели от горската инвентаризация, от друга, разкрива наличието на статистически значими връзки. Най-високи стойности на коефициента на Пирсон (r) бяха отчетени за параметрите височина, диаметър и запас на 1 ha, което показва, че тези характеристики са особено чувствителни към вариациите в спектралните отразителни свойства на насажденията.

2. Индекси, свързани с биомаса и запас

Индексите EVI и SR, които са утвърдени като показатели за фотосинтетична активност и продуктивност [7, 33], показаха умерена до силна корелация със запаса на 1 ha (r = 0.46 и r = 0.52 съответно). Това съответства на резултатите на Zhang et al. (2016) [34], според които комбинацията от EVI и структурни данни от LiDAR подобрява точността при моделиране на биомаса.

Подобно, NDMI, чувствителен към съдържанието на влага в биомасата [17], също демонстрира положителна зависимост със запаса (r = 0.42). Тази зависимост потвърждава връзката между водното съдържание на растителността и продуктивността на иглолистните насаждения. Подобни резултати са докладвани и от Méliczek, K. & Verrelst, J. (2023) [35], които установяват, че NDMI и други индекси, базирани на SWIR диапазона, показват силна корелация с надземната биомаса и запаса при смърчови гори в Централна Европа. Според авторите, влагата в тъканите играе решаваща роля за поддържането на фотосинтетичната активност и растежа, което прави водните индекси надежден индикатор за оценка на продуктивността на горите.

3. Индекси, свързани с хлорофил и фотосинтеза

Хлорофилно-базираните индекси като CCCI и NDRE2 показаха най-силна връзка с височината и диаметъра на дърветата (r = 0.48 и r = 0.44). Това потвърждава, че физиологичното състояние на листната маса е тясно обвързано с растежа на насажденията [13, 23].

4. Биофизични параметри

Сред трите биофизични продукта, генерирани чрез SNAP Biophysical Processor, LAI демонстрира най-висока корелация с таксационните показатели – особено с пълнотата (r = 0.51) и запаса (r = 0.47).

5. Сравнение между подотдели

Разпределението на стойностите по подотдели показва, че насажденията с по-висока възраст и по-голям диаметър имат по-стабилни зависимости със спектралните индекси, докато младите подотдели демонстрират по-висока вариабилност.

Допълнителната стратификация на данните по експозиция показа, че северните склонове показват по-добри статистически резултати, което може да се обясни разликата в микроклиматичните условия.

Заключение

Тестването на предложената методика за сателитен мониторинг на иглолистни гори показа зависимостта между избрани вегетационни индекси, комплексна картина на тяхното състояние, здраве и продуктивност. Първоначалните корелационни зависимости между спектралните данни получени от сателита Sentinel-2 и таксационните характеристики бяха ниски, което категорично наложи необходимостта от стратифициране на изследваните горски подотдели по изложение – на северни и източни и южни и западни склонове. Този подход се оказа решаващ, тъй като значително подобри статистическата зависимост между индексите и параметрите на гората, подчертавайки критичното влияние на микроклиматичните условия върху спектралното отражение.

Литература:

1. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2020
2. Herold, M., Carter, S., Avitabile, V., Espejo, A. B., Jonckheere, I., Lucas, R. M., McRoberts, R. E., Næsset, E., & Nightingale, J. Challenges and Opportunities in the Use of Remote Sensing for Forest Monitoring. Remote Sensing, 14 (4), 937–956, 2022
3. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36, 2012
4. Zhu, Z., Wulder, M. A., Roy, D. P., Woodcock, C. E., Hansen, M. C., Radeloff, V. C., Healey, S. P., Schaaf, C., Hostert, P., Strobl, P., Pekel, J.-F., Lymburner, L., Pahlevan, N., & Scambos, T. A. Benefits of the Landsat Program to Society. Remote Sensing of Environment, 224, 382–393, 2019
5. Sa, R., & Fan, W. Estimation of Forest Parameters in Boreal Artificial Coniferous Forests Using Landsat 8 and Sentinel–2A. Remote Sensing, 1514, 3605, 2023
6. Xu, L., Zhang, J., Li, S., & Chen, X. Integration of LiDAR, SAR, and Optical Data for Large-Scale Forest Carbon Stock Estimation. Forests, 16(2), 214–229, 2025
7. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, 83 (1–2), 195–213, 2002
8. Becker, R., Fassnacht, F. E., & Latifi, H. Detection of Forest Structure and Health Using Combined Optical and SAR Data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 142, 1–16, 2018
9. Димитров, А. Автореферат: Използване на дистанционни методи за мониторинг на иглолистни гори в България. София: ЛТУ, 2022
10. Todorova, E., & Zhiyanski, M. Spatial and Temporal Exploration of NDVI, LAI, and SMI in Coniferous Forests: Detecting Changes in Parangalitsa Reserve. Journal of the Bulgarian Geographical Society, 52, 59–78, 2025
11. Copernicus Open Access Hub. Sentinel-2 Mission – Level-2A Products. European Space Agency (ESA). Retrieved from: https://scihub.copernicus.eu, 2015
12. Jensen, J. R. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. 3rd ed., Pearson Education, 2015
13. Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco–Tejada, P. J., & Dold, C. Integrated Narrow–Band Spectral Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture. Remote Sensing of Environment, 81 (2–3), 416–426, 2002
14. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Available at: https://qgis.org
15. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 Biophysical Processor – Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). ESA Sentinel Online, 2021
16. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. NASA-CR-132982, 1973
17. Gao, B.-C. Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. Imaging Spectrometry, Vol. 2480, pp. 225–236, SPIE, 1995
18. Metternicht, G. Vegetation Indices Derived from High-Resolution Airborne Videography for Precision Crop Management. International Journal of Remote Sensing, 24 (14), 2855−2877, 2003. https://doi.org/10.1080/01431160210163074
19. Wang, L., & Qu, J. J. NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for Monitoring Soil and Vegetation Moisture with Satellite Remote Sensing. Geophysical Research Letters, 34 (20), 2007. https://doi.org/10.1029/2007GL031021
20. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment, 55(2), 95–107, 1996. https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7
21. Steven, M. D. The Sensitivity of the OSAVI Vegetation Index to Observational Parameters. Remote Sensing of Environment, 63(1), 49−60, 1998. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00114-4
22. Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey, J. E. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. Remote Sensing of Environment, 74(2), 229–239, 2000. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9

23. Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. Relationships Between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves. Journal of Plant Physiology, 160 (3), 271−282, 2003. https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887
24. Buschmann, C., & Nagel, E. In Vivo Spectroscopy and Internal Optics of Leaves as Basis for Remote Sensing of Vegetation. International Journal of Remote Sensing, 14 (4), 711–722, 1993. https://doi.org/10.1080/01431169308904370
25. Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. Leaves. Journal of Plant Physiology, 143 (3), 286−292, 1994
26. Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., Moran, M. S. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data. Proc. 5th Int. Conf. on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA, 2000
27. Gitelson, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. Journal of Plant Physiology, 161 (2), 165−173, 2004. https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176
28. Gao, B.-C. NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. Remote Sensing of Environment, 58, 257−266, 1996. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3
29. Louhaichi, M., Borman, M., & Johnson, D. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. Geocarto International, 16 (1), 65−70, 2001. https://doi.org/10.1080/10106040108542184
30. Huete, A. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25 (3), 295−309, 1988. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X
31. Mishra, S., & Mishra, D. R. Normalized Difference Chlorophyll Index: A Novel Model for Remote Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Turbid Productive Waters. Remote Sensing of Environment, 117, 394−406, 2012. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016
32. Jordan, C. F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. Ecology, 50 (4), 663−666, 1969. https://doi.org/10.2307/1936256
33. Tucker, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127−150, 1979. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0
34. Zhang, K., Thapa, B., Ross, M., & Gann, D. Remote Sensing of Seasonal Changes and Disturbances in Mangrove Forest: A Case Study from South Florida. Ecosphere, 7 (6), e01366, 2016. https://doi.org/10.1002/ecs2.1366
35. Méliczek, K., & Verrelst, J. Evaluating Moisture-Sensitive Spectral Indices for Monitoring Forest Productivity and Biomass Using Sentinel-2 Data. Remote Sensing of Environment, 297, 113769, 2023. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113769

MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELLING OF COMMUNICATIONS BETWEEN GPS/GNSS SATELLITES WITH ACCOUNT OF THE GENERAL RELATIVITY EFFECTS

Bogdan Dimitrov[1,2]

[1]*Institute of Nuclear Research and Nuclear Energetics and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences*
[2] *Institute for Advanced Physical Studies (IAPS) – Sofia*
e-mail: dimitrov.bogdan.bogdan@gmail.com; bogdan.dimitrov@iaps.institute

Keywords: *intersatellite communications, Applied General Theory of Relativity, elliptic functions and integrals, algebraic geometry*

Abstract: *The intersatellite communications represent a new, important element in the contemporary conception about navigation. The main peculiarity of the propagation of a signal in a gravitational field is that the trajectory of the signal is curved. The report is a short review of the author's publications during the last 8 years on the problem about the exchange of signals between moving satellites, requiring the application of the methods of General Relativity Theory, as well as of the mathematical methods of algebraic geometry and elliptic integrals. New notions about "space-time distance" (which can be negative, equal to zero or positive), as well as about "geodesic distance" are introduced. Another new result is that the time for the propagation of the signal is expressed by means of elliptic integrals. The numerical calculation shows that the signal is propagating at a distance 26, 558.15102 [km] for a time 0.028134 [s]. This distance is comparable by order to the characteristic distance for intersatellite communications 49,465 [km].*

МАТЕМАТИЧЕСКО И ФИЗИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА КОМУНИКАЦИИ МЕЖДУ GPS/GNSS СПЪТНИЦИ С ОТЧИТАНЕ ЕФЕКТИТЕ НА ОБЩАТА ТЕОРИЯ НА ОТНОСИТЕЛНОСТ

Богдан Димитров[1,2]

[1]*Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика – Българска академия на науките*
[2]*Институт за съвременни физически изследвания (ИСФИ) – София*
e-mail: dimitrov.bogdan.bogdan@gmail.com; bogdan.dimitrov@iaps.institute

Ключови думи: *междуспътникови комуникации; Приложна Обща Теория на Относителност; елиптични функции и интеграли; алгебрична геометрия*

Резюме: *Междуспътниковите комуникации са нов, съществен елемент на съвременната концепция за навигация. Главна особеност на разпространение на сигнали в гравитационно поле е, че траекторията им се изкривява . Докладът представлява кратък обзор на работите на автора през последните 8 години върху проблема за обмен на сигнали между движещи се спътници, изискващ прилагане методите на ОТО, както и на математически методи на алгебричната геометрия и елиптичните интеграли. Въведени са новите понятия за „пространствено-временно разстояние" (може да бъде отрицателно, нулево или положително), също и „геодезично разстояние". Друг нов резултат: изразяване на времето на разпространение на сигнала чрез елиптични интеграли. Численото пресмятане показва, че сигналът се разпространява на разстояние 26, 558.15102 [km] за време 0.028134 [s]. По порядък разстоянието е сравнимо с характерното разстояние за междуспътникови комуникации 49,465 [km].*

Introduction

Intersatellite communications are very important in view of creating a network of satellites and achieving high-rate data transfer [1], laser communications between satellites and relaying data around the globe with the purpose of early warning/tracking of missile launching [2].

Since 2003, after the review article [3] of Prof. Neil Ashby, the formalism of GRT has been commonly applied. A fundamental fact is that the trajectory of a signal (electromagnetic or laser), propagating in the near-Earth space is curved, due to which the signal is propagating at a greater time in comparison with the propagation time for the case of a flat space-time. Thus, this propagation time for the case of the curved space-time around the Earth is expressed by the simple formulae, well known in the literature as the Shapiro delay formulae

(1) $$T_{AB} = \frac{R_{AB}}{c} + \frac{2G_{\oplus}M_{\oplus}}{c^3}\ln\left(\frac{r_A + r_B + R_{AB}}{r_A + r_B - R_{AB}}\right) .$$

In the above formulae the second term (the logarithmic correction) is related to the action of the gravitational field and is called the Shapiro time delay term. The propagation time T_{AB} for the propagation of the signal between two points A and B is obtained after integrating the s. c. null cone equation

(2) $$ds^2 = 0 = g_{00}c^2dT^2 + 2g_{0j}cdTdx^j + g_{ij}dx^idx^j$$

for the metric element in the near-Earth space

(3) $$ds^2 = -(c^2 + 2V)(dT)^2 + (1 - \frac{2V}{c^2})((dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2) .$$

Formulae (1) has several shortcomings, not making it possible to be applied for communications between satellites.

1. It depends on the initial and final moments of emission and reception of the signal and on the final distance of propagation of the signal, which is not known initially. No signal-receiving satellite is assumed to be situated at the final point. In this report and in all the papers [4, 5], [6] the aim will be to find the signal propagation timeT, so that the reception of the signal by the second satellite has to take into account not only the curving of the trajectory of the signal due to GRT-effects, but also the uncorrelated motion of the two satellites (on one orbit or on two different orbits).
2. Formulae (1) does not give the propagation time for concrete circumstances – for example, the propagation time of a signal, emitted by a satellite, moving on a plane elliptic orbit (characterized by the semi-major axis a, the ellipticity e and the eccentric anomaly angle E) or on a space-oriented orbit, characterized by 6 Kepler parameters with a dynamical parameter the angle of true anomaly f. For both cases, a qualitatively new result has been obtained [7], [8], [9] - the propagation time was expressed in terms of a combination of elliptic integrals of the first, second and the third kind (the first case of a plane orbit) or in terms of a combination of elliptic integrals of second and fourth order (for satellites, moving on space-oriented orbits).

In (1) the first term is the Euclidean distance, divided by the velocity of light **c.** However, in the framework of GRT the distance is given by the metric, so one cannot separate a “flat”-spacetime part and a “curved”-part. In [10] a modification of the Shapiro formulae (1) has been proposed

(4) $$T \approx \frac{1}{c}\int_{path}\sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2 + (\dot{z})^2}\mathrm{ds} + \frac{2G_{\oplus}M_{\oplus}}{c^3}\int\frac{\sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2 + (\dot{z})^2}}{R_{AB}}dR_{AB} ,$$

where in the first term the distance is measured along a curve with a parameter *s* and $G_{\oplus}M_{\oplus}$ is the geocentric gravitational constant**.**

The algebraic geometry method of two null four-dimensional intersecting cones (case of plane elliptic orbits) – basic equations, newly introduced physical notions and some consequences

This method for calculation of the propagation time of a signal, emitted by a moving satellite and intercepted by another moving satellite has been proposed in the papers of the author [4, 5] and subsequently summarized in the review paper [6]. The basic idea is to write the null cone equation (2) for the metric (3) at two different space-time points

(5) $ds_1^2 = -(c^2 + 2V_1)(dT_1)^2 + \left(1 - \frac{2V_1}{c^2}\right)((dx_1)^2 + (dy_1)^2 + (dz_1)^2) = 0$,

(6) $ds_2^2 = -(c^2 + 2V_2)(dT_2)^2 + \left(1 - \frac{2V_2}{c^2}\right)((dx_2)^2 + (dy_2)^2 + (dz_2)^2) = 0$

and subsequently, to intersect these four-dimensional cones with the hyperplane, formed by the differential of the square of the Euclidean distance

(7) $dR_{AB}^2 = \mathrm{d}(x_1 - x_{2)}{}^2 + \mathrm{d}(y_1 - y_{2)}{}^2 + \mathrm{d}(z_1 - z_{2)}{}^2$.

For the case of plane elliptic orbits, expressions (5) – (7) represent a system of three (nonlinear) algebraic equations with respect to three variables - the differential of the square of the Euclidean distance and the differentials of the two propagation times. If the two satellites are on two-dimensional plane elliptic orbits, parametrized in the standard way as

(8) $x_1 = a_1(cosE_1 - e_1)$, $x_2 = a_2(cosE_2 - e_2)$, $y_1 = a_1\sqrt{1 - e_1^2}\sin E_1$, $y_2 = a_2\sqrt{1 - e_2^2}\sin E_2$,

then a differential equation in full derivatives is obtained with respect to the square of the Euclidean distance. The solution will no longer be equal to the Euclidean distance [4, 5], but will represent the s. c. “space-time” distance, which in analogy with the space-time interval in Special and General Relativity can be negative, equal to zero or positive. Let us take the limiting case

(9) $e_1 = e_2 = e$, $a_1 = a_2 = a$, $E_1 = E_2 = E$.

Since the positions of the two satellites will coincide, the Euclidean distance will be zero, but the space-time distance (denoted below as $\hat{R}_{AB}^2$) will be non-zero and will be equal to

(10) $\hat{R}_{AB}^2 = 4a^2 sin^2 E.(1 - e^2) + a^2(e^2 - 2)$.

It can be positive, negative or equal to zero. The equality to zero is satisfied if

(11) $sin^2 E = \frac{2 - e^2}{4(1 - e^2)}$.

In fact, this condition in the papers [4, 5] is called “the compatibility condition for intersatellite communications”, because it can be obtained after requiring the space-time distance to be comparable to the Euclidean distance. For the typical value of the eccentricity $\mathrm{e} = 0.01323881349526$ for the GPS orbit, the limiting value for the eccentric anomaly angle from the compatibility condition (10) is

(12) $E_{lim} = arcsin\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2 - e^2}{1 - e^2}}\right]$,

which has the numerical value $45.002510943228\ [\mathrm{deg}]$. Although the eccentricity is taken for the GPS orbit, a disposition of satellites on one orbit (equal values for the large semi-major axis and equal eccentricities) for the above angular distance is typical for the Russian *GLONASS* satellite constellation (Global’naya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema) with 8 satellites, situated on one orbit. For the eccentricity of the GLONASS satellite orbits $e = 0.02$, the value for E slightly changes to $\mathrm{E} = 45.00573\ [\mathrm{deg}]$**.** Another restriction on the orbit eccentricity $\mathrm{e} \leq 0.81649658092$ follows from equality (11), since $sinE \leqq 1$ is fulfilled for $sinE$ as a trigonometric function. This means that for the Space-Ground Radio Interferometer Radio-Astron with a variable baseline, consisting of a satellite on an orbit with a large semi-major axis $a \approx 0.2 \times 10^6\ [km]$ and a variable eccentricity of the satellite orbit, ranging from $e = 0.59$ to $e = 0.966$, the communications between satellites on the orbit are reliable only in the range $0.59 < \mathrm{e} \leq 0.81649658092$**.**

The third important physical notion, introduced in [4, 5] is about the “geodesic distance” – this is the real distance, travelled by the light or radio signal. Since this is a real distance, it should be positive and in accord with the physical essence of the Shapiro formulae (1), it should be greater also than the Euclidean distance. This is proved in a strict mathematical way for the general case in the papers [4, 5], because the geodesic distance is obtained after the “compatibility condition” is substituted in the formulae for the space-time distance. From the difference between the squares of the two distances the greatness of the geodesic distance (denoted with a $\sim$(tilda) sign above) becomes evident

(13) R_{AB}^2 - $\tilde{R}_{AB}^2$= $\frac{1}{2}(a_1^2 + a_2^2)$ - $e_1 e_2 a_1 a_2 + \frac{1}{4}(a_1^2 e_1^2 + a_2^2 e_2^2)$ - $2a_1 a_2\sqrt{(1-e_1^2)(1-e_2^2)}$.

In the limiting case of equal eccentricities and equal semi-major axis, this equality proves that the geodesic distance is greater than the Euclidean distance

(14) $\tilde{R}_{AB}$=$\sqrt{R_{AB}^2 + a^2(1-\frac{3}{2}e^2)}$.

Elliptic integrals for calculation of the propagation time of the signal for the case of satellites on plane elliptical orbits

Equations (5) and (6) represent differential equations with respect to the propagation time, defined for each of the satellites. The propagation time depends on variables, related to the motion of the satellites. For the case of the plane elliptic orbits, the dynamical parameters, related to the motion of the two satellites are the two eccentric anomaly angles E_1 and E_2. For the case of space-oriented orbits, the dynamical parameters will be the two true anomaly angles f_1 and f_2. All the other Kepler parameters, characterizing the orbit will be present in the formulas, but will not be dynamical ones. Moreover, each of the equations (5) and (6) will depend either on only E_1 or f_1, or on E_2 or f_2. The element of integration dr is lying in the plane of the orbit.

For a plane elliptic orbit, characterized by the parameters (a, e, E), the propagation time T is calculated in the paper [8] and then in the review article [7] of the author as

(15) $T = \frac{a}{c}\int\sqrt{1-e^2cos^2E}\,dE - \frac{2G_\oplus M_\oplus}{c^3}\int\sqrt{\frac{1+ecosE}{1-ecosE}}\,dE$.

It is important that the calculation turned out to be possible under the approximation

(16) $\beta = \frac{2V}{c^2} = \frac{2G_\oplus M_\oplus}{c^2 a} \ll 1$, $\frac{2G_\oplus M_\oplus}{c^2 r_s} = 0.167.10^{-9}$, $G_\oplus M_\oplus = 3986005 \times 10^8 \left[\frac{m^3}{s^2}\right]$.

Physically related to weak gravitational fields and slow motion – these assumptions in gravitational physics are compatible with the Equivalence Principle [11] fields. Inequality (16) is obtained for the value of the velocity of light $c = 299{,}792.458\,[\frac{km}{s}]$ and value of the large semi-major axis $a = 26{,}561\,[\mathrm{km}]$. It can be checked also that the coefficient in front of the first integral in (15) has the dimension of $[\frac{m}{\frac{m}{s}}]$ =[s], and the value of the coefficient in front of the second integral (the geocentric gravitational constant, divided by the third power of c) has the dimension $[\frac{\frac{m^3}{s^2}}{\frac{m^3}{s^3}}]$=[s]**.** Thus, the proper dimension for the coefficients in expression (15) for the propagation time T is a confirmation of the correctness of the mathematical formalism. If the inequality (16) is not taken into account, in [7] and [8] it was shown that yet a solution for T can be found, but in terms of an integral, which is not an abelian one and not possible to be solved analytically.

In (15) the first term is an elliptic integral of the second kind and the second term can be decomposed as a sum of an elliptic integral of the first kind and in the Weierstrass form (third-order polynomial under the square root in the denominator) [7, 8]

(17) $I_2^{(A)}$=$\frac{4G_\oplus M_\oplus}{c^3}.\frac{1}{\tilde{k}\sqrt{1-e^2}}.\int\frac{d\check{y}}{\sqrt{\check{y}(\check{y}+1)(\check{y}+\frac{1}{k^4})}}$

and an elliptic integral of the third kind, again in the Weierstrass form

(18) $I_2^{(B)}$=$\frac{4G_\oplus M_\oplus}{c^3 q^2}.\frac{1}{\sqrt{1-e^2}}\int\frac{d\check{y}}{(\check{y}_1-\frac{1}{q^2})\sqrt{\check{y}_1(\check{y}_1+1)(\check{y}+\frac{1}{q^2})}}$.

Both integrals (17) and (18) are written in terms of variables, depending on $cosE$ and with coefficients, inversely proportional to the third power of the velocity of light c. Thus, their contribution will be much smaller than the contribution of the first integral in (15), which is inversely proportional to **c**. The numerical calculation (by means of online programs for numerical calculation of elliptic integrals) of the first integral in (15), performed by using the sixth iteration for eccentric anomaly angle

E_6 from the Kepler equation (see the details in the review article [7]) gives the numerical value for the leading term in (15) for the propagation time

(19) $$T_1^{(E_6)}=\frac{a}{c}\int_0^{E_{(6)}}\sqrt{1-e^2cos^2E}\,dE=-0.0281342485273829\,[s]\ .$$

From the Kepler equation and for the sixth iteration E_6, the celestial time of motion for the satellite is calculated to be $T_{cel}=37.5082561\,[\mathrm{s}]$. If the velocity of the satellite is taken to be $\mathrm{v}=3.874\,[\frac{km}{s}]$, the satellite will move at a distance $145.125\,[\mathrm{km}]$. If the propagation time for the signal (19) is multiplied by the light velocity (thus, the curving of the trajectory of the signal due to the gravitational field in the framework of GRT is taken into account), the signal will propagate at a distance $26{,}558.151016917626350\,[\mathrm{km}]$. Consequently, the propagation time is much smaller than the celestial time of motion of the satellite. This is so because the celestial time of motion is related to celestial mechanics, while the propagation time is an effect, following from General Relativity Theory.

Elliptic integrals of higher order for calculation of the propagation time of the signal for the case of satellites on space-oriented elliptical orbits

The position of space-oriented orbits is specified by 6 Kepler parameters $(a,e,\mathrm{I},\omega,\Omega,f)$ [9], which determine not only the position of the satellite on the orbit (related to the true anomaly angle f) and the parameters of the elliptic orbit (a,e), but also the position of the orbit in space $(\mathrm{I},\omega,\Omega)$, where I is the inclination of the orbit with respect to the equatorial plane. If at each point of the orbit the Cartesian coordinates are X,Y,Z, then the mapping $(X,Y,Z)\rightarrow(a,e,\mathrm{I},\omega,\Omega,f)$ from a topological point of view signifies a transition to a submersion manifold [10] (of 6 dimensions-more than the 3 dimensions of the initial manifold). The propagation time $\bar{T}$ for a signal, if emitted by a satellite on a space-oriented orbit with the only dynamical parameter-the true anomaly angle f is much more complicated (below i is the imaginary unit)

(20)
$$\bar{T}=i\left[-2\frac{na}{c}q^{\frac{3}{2}}+4\frac{G_\oplus M_\oplus n^2a}{c^4\,(1-e^2)^{\frac{3}{2}})}q^{\frac{3}{2}}\right]\tilde{J}_2^{(4)}(y,q)$$
$$+\,i\left[-\frac{2G_\oplus\ \ M_\oplus naq^{\frac{5}{2}}(1+e^2)}{c^3}\tilde{J}_2^{(4)}(\tilde{y},q)+\frac{2G_\oplus M_\oplus nq^{\frac{3}{2}}(1+e^2)}{c^3(1-e^2)}\tilde{J}_4^{(4)}(\tilde{y},q)\right],$$

where the second- and fourth- order elliptic integrals are expressed in the Legendre form

(21) $$\tilde{J}_2^{(4)}(y,q)=\int\frac{y^2dy}{\sqrt{(1-y^2)(1-q^2y^2)}}\ ,\quad \tilde{J}_4^{(4)}(\tilde{y},q)=\frac{q^5}{i}\int\frac{\hat{y}^4d\hat{y}}{\sqrt{(\hat{y}^2-1)(1-q^2\hat{y}^2)}}\ .$$

The variables $y,\tilde{y},\hat{y}$ and q are defined as

(22) $$y=\sqrt{\frac{(1+ecosE)}{q(1-ecosE)}}\ ,\quad \tilde{y}=\frac{\sqrt{1+2ecosf+e^2}}{1+e}\ ,\quad \hat{y}=\frac{\tilde{y}}{q}\ ,\quad q=\frac{1-e}{1+e}\ .$$

Conclusion

This paper has the purpose to review two major approaches, proposed in a series of papers in the last 8 years: the method of "four-dimensional intersecting null cones" and the elliptic integrals method for calculation of the propagation time of the signal. The previously introduced notions of "space-time distance", "condition for intersatellite communication" and "geodesic distance" in fact refer to the case, when the two null cones are intersecting. Yet, the newly derived equality (14) for the geodesic distance and for the simplified case of equal eccentricities and semi-major axis clearly shows that that in this approach the property of the light signal to travel a greater distance is preserved, as it is the case for the Shapiro delay formulae (1). It is very interesting that the greater value for the geodesic distance in comparison with the Euclidean distance is related also with the restriction $\mathrm{e}\leq 0.81649658092$ on the eccentricity of the orbit and the limiting values $0.59<\mathrm{e}\leq 0.81649658092$ for the eccentricity of the orbit of the Space-Ground Radio Interferometer Radio-Astron. The last restriction is also natural for satellites on high elliptical orbits such as SBIRS (Space-Based Infrared System), consisting of four satellites, operating on geosynchronous Earth orbit, and sensors on two host satellites in a highly (large, with a large value of e) elliptical orbit. Elliptical orbit spacecrafts move with a variable orbit angular velocity, so it cannot be written as an explicit

expression of a time function [12]. Yet, the given value for the eccentricity of highly elliptic orbit $e = 0.7146$ in the monograph [12] falls well within the calculated in this paper range $e \leq 0.81649658092$, so satellites can still operate and exchange signals.

The other important result in the papers [6], [8], [9] and in the review paper [7] concerns a new method for expressing the propagation time of the signal in terms of elliptic functions. The calculated propagation distance for the value of time $T = 0.0281342485273829$ [s] in formulae (19) by using special online programs for numerical calculation of elliptic integrals is typical for the inter-satellite communications.

References:

1. Jan 9, 2025, U.S. military satellites achieve first cross vendor laser communications link https://spacenews.com/u-s-military-satellites-achieve-first-cross-vendor-laser-communications-link/
2. Jan 10, 2025 Small Satellite Architectures Get New Boosts From SDA, NRO https://www.airandspaceforces.com/sda-nro-small-satellite-architectures/
3. Ashby, N. Relativity in the Global Positioning System. *Living Rev. Relativ.* 6, 1 (2003). https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1
4. Dimitrov B., Two null gravitational cones in the theory of GPS-intersatellite communications between two moving satellites. I. Physical and mathematical theory of the space-time interval and the geodesic distance on intersecting null cones. https://arxiv.org/abs/1712.01101v3, 162 p. (2017)
5. Dimitrov, B. New Mathematical Models of GPS Intersatellite Communications in the Gravitational Field of the Near-Earth Space. AIP Conf. Proc. 2075, 040007 (2019), https://arxiv.org/abs/1909.12753v1 [gr-qc], https://sci-hub.mksa.top/10.1063/1.5091167
6. Dimitrov, B. Algebraic Geometry and Elliptic Integrals Approach for Calculation of the Propagation Time of a Signal Between GPS Satellites with Account of General Relativity Theory, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2675 012026 (45 pages) (2023) review article at https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2675/1/012026
7. Dimitrov, B. New Applications of Elliptic Functions and Integrals in GPS Inter-Satellite Communications with Account of General Relativity Theory, review article, special volume “Advances in Elliptic Equations and Their Applications” of the MDPI journal “*Mathematics*” 13 (8) 1286 (67 pages) (2025), online at https://www.mdpi.com/2227-7390/13/8/1286
8. Dimitrov, B. Elliptic Integrals for Calculation of the Propagation Time of a Signal, Emitted and Received by Satellites on One Orbit. AIP Conf. Proc. 2522, 090004-1-090004-13 (2022) https://arxiv.org/pdf/2201.13208.pdf [physics.gen-ph]; https://web.archive.org/web/20220928062950id_/https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/5.0101261
9. Dimitrov, B. New Methods for Analytical Calculation of Elliptic Integrals Applied in Various Physical Problems; AIP Conf. Proc. 2953, 070002 (19 pages) (2023); https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2953/1/070002/2922309/New-methods-for-analytical-calculation-of-eliptic
10. Dimitrov, B. Topological, Differential Geometry Methods and Modified Variational Approach for Calculation of the Propagation Time of a Signal, Emitted by a GPS-Satellite and Depending on the Full Set of 6 Kepler Parameters, 2024 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2910 012001 (39 pages) (2024) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2910/1/012001; https://arxiv.org/abs/2501.04043
11. Fock, V. Theory of Space, Time and Gravitation, Pergamon Press, New York, USA, 1959
12. Liu, F., S. Lu and Y. Sun Guidance and Control. Technology of Spacecraft on Elliptical Orbit Singapore Beijing, Springer Nature Singapore Pte Ltd. and National Defense Industry Press, 2019.

МОДЕЛ ЗА МАШИННО ОБУЧЕНИЕ ЗА КРАТКОСРОЧНА ПРОГНОЗА НА ВРЕМЕТО

Михаил Първанов

Департамент „Прогнози и информационно обслужване“, Национален институт по метеорология и хидрология, студент бакалавърска програма „Информатика“ в Нов български университет
e-mail: mparvanovm@gmail.com

Ключови думи: *метеорологичен модел, Random Forest*

Резюме: *Този доклад представя разработването и прилагането на модел за машинно обучение, базиран на регресия Random Forest, за прогнозиране на краткосрочни тенденции в температурата на въздуха. Моделът е обучен върху многогодишни данни от метеорологични станции, включващи променливи като температура, влажност, скорост на вятъра и атмосферно налягане. Използвани са лагови характеристики и сезонни цикли за улавяне на времевите зависимости. Валидирането показва висока точност при 24-часови прогнози, докато остават предизвикателства при разширяване на прогнозите над 48 часа. Изследването подчертава потенциала на подходите, базирани на изкуствен интелект, да допълват съществуващите числени модели за прогнозиране на времето чрез предоставяне на бързи, основани на данни прогнози с относително ниски изчислителни разходи.*

MACHINE LEARNING MODEL FOR SHORT-TERM WEATHER FORECASTING

Mihail Parvanov

Department of Forecasts and Information Services, National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH), student in the “Informatics” Bachelor’s program at New Bulgarian University
e-mail: mparvanovm@gmail.com

Keywords: *meteorological model, Random Forest*

Abstract: *This report presents the development and application of a machine learning model based on Random Forest regression for predicting short-term air temperature trends. The model is trained on multi-year meteorological station data, including variables such as temperature, humidity, wind speed, and pressure. Lagged features and seasonal cycles are incorporated to capture temporal dependencies. Validation demonstrates high accuracy for 24-hour forecasts, while challenges remain for extending predictions beyond 48 hours. The study highlights the potential of AI-based approaches to complement existing numerical weather prediction systems by providing rapid, data-driven insights with relatively low computational costs.*

Въведение

Температурата на въздуха е ключов метеорологичен параметър с широко практическо значение. Традиционно прогнозите се изготвят чрез числени модели за прогнозиране на времето (NWP), които решават системи от частни диференциални уравнения, описващи динамиката на атмосферата. Тези подходи са точни, но изискват сериозен изчислителен ресурс и време.

Машинното обучение (ML) предлага алтернативен подход, базиран на извличане на закономерности от исторически наблюдения, без директно решаване на физически уравнения. Настоящото изследване представя регресионен модел Random Forest за краткосрочна прогноза на температура с хоризонт до 72 часа.

Прогнозата на температурата има пряко въздействие върху редица критични сектори. Например, енергийният сектор разчита на краткосрочни прогнози за температурите, за да

оптимизира производството и разпределението на електроенергия и природен газ. В транспорта, температурните колебания влияят върху безопасността на движението, особено през зимния сезон, когато температурите преминават през точката на замръзване. В земеделието температурите определят времето за сеитба, растеж и прибиране на реколтата, както и риска от измръзване или топлинен стрес.

Прогнозите за температурата подпомагат здравните системи при предвиждане на периоди с екстремна горещина или студ. Управлението на рискове при бедствия — например топлинни вълни или студени фронтове — също зависи от надеждни температурни прогнози.

Обсъждане в контекста на съществуващи изследвания

Методът Random Forest има силна теоретична и емпирична подкрепа в научната литература. Още в класическата работа на [1] се подчертава, че ансамбловият подход позволява намаляване на вариацията без увеличаване на пристрастността, което го прави особено подходящ за прогнози в шумни среди като атмосферните процеси.

Класическите статистически методи често се затрудняват с улавянето на нелинейните зависимости между метеорологичните параметри [2]. Random Forest преодолява тази трудност чрез използване на множество дървета и случайност в избора на признаци.

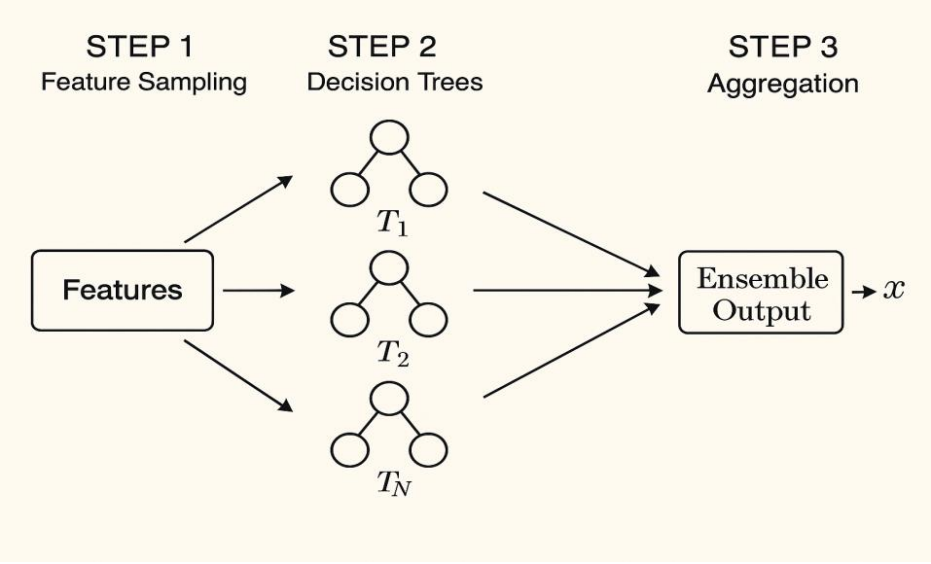
Сравнение с резултатите от числени модели показва, че дори сравнително прости ML модели могат да постигнат сравнима точност в краткосрочен хоризонт. Подобни наблюдения се споменават и в [3], където се подчертава потенциалът на машинното обучение за допълване на NWP моделите.

Предимства и ограничения на Random Forest

Random Forest има няколко ключови предимства:

- Робустност към шум и липсващи данни — моделът запазва добра точност дори при непълни или неточни наблюдения;
- Нелинейно моделиране — не изисква предположения за формата на зависимостта между входа и изхода [4];
- Интерпретируемост — чрез анализ на значимостта на признаците може да се идентифицират ключовите фактори, определящи температурната динамика.
- Въпреки това има и ограничения:
- Невъзможност за екстраполация извън диапазона на наблюденията — моделът се учи от миналото и не може да предвиди стойности в непознати режими;
- Висока зависимост от качеството на входните данни;
- Ограничена физическа интерпретация в сравнение с NWP моделите.

Теоретична основа на метода



Фиг. 1. Схематично представяне на алгоритъма Random Forest

Random Forest е ансамблов модел, който комбинира множество дървета на решение, за да подобри стабилността и точността на прогнозите (фиг. 1). По този начин всяко дърво „вижда“ малко по-различна картина на проблема, което създава разнообразие в ансамбъла. При построяването на всяко дърво на всяка стъпка на разделяне се избира случаен поднабор от входните променливи, от които се търси най-подходящата за разделяне. Това допълнително увеличава разнообразието между дърветата и намалява риска няколко от тях да направят едни и същи грешки.

Параметризацията на сложни атмосферни процеси, като облачна наситеност и турбулентни взаимодействия, е ключов елемент за подобряване на прогностичните модели [5]. Подобни физически механизми могат ефективно да бъдат аппроксимирани и от ансамблови машинно-обучаващи се методи като Random Forest.

Всяко дърво извършва прогноза $h_i(x)$ за даден вектор от входни признаци x. Крайната прогноза на ансамбъла се изчислява като средно аритметично (1).

(1) $$\hat{y}(x) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h_i(x)$$

След като всички дървета са обучени, техните предсказания се обединяват. При регресионни задачи — резултатите се осредняват, което изглажда индивидуалните грешки на отделните дървета. При класификационни задачи — се използва гласуване по мнозинство. Едно от ключовите предимства на този подход е намаляването на вариацията на модела, без значително увеличаване на отклонението. Индивидуалните дървета могат да бъдат „шумни“ и склонни към преобучаване, но когато се комбинират в ансамбъл, грешките им до голяма степен се компенсират взаимно. Така Random Forest постига висока стабилност и точност, особено при данни с много променливи и нелинейни зависимости. Сложността на модела може да бъде контролирана чрез броя на дърветата в гората и чрез ограничаване на дълбочината им. Колкото повече дървета се използват, толкова по-устойчив става моделът, до момента в който точността се стабилизира. Контролът върху дълбочината на дърветата предотвратява прекомерно напасване върху тренировъчните данни и осигурява по-добра генерализация върху нови наблюдения. Благодарение на тези характеристики, Random Forest се счита за един от най-надеждните ансамблови методи за прогнозиране и често превъзхожда по-опростени модели, особено в реални приложения с шумни и сложни данни.

Обучението цели минимизиране на функция на загубите, обикновено средноквадратична грешка (2).

(2) $$MSE = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left(y_j - \hat{y}_j\right)^2$$

Една от силните страни на Random Forest е устойчивостта му спрямо шумни данни и корелации между признаците. Всеки отделен модел — решаващо дърво — е сравнително слаб предсказател, но когато резултатите от стотици такива дървета се усреднят, се получава стабилна и надеждна прогноза. За разлика от линейните модели, Random Forest може да улавя нелинейни зависимости. Важен аспект е и оценката на значимостта на признаците, която помага да се разбере кои фактори влияят най-много върху температурата.

Използвани данни и характеристики

За разработката на модела са осигурени метеорологични данни от отворени локални сензорни станции [6], които предоставят измервания с висока пространствена и времева резолюция (на всеки 3 часа) и обхващат множество наблюдателни точки. Наборът от признаци включва температура, относителна влажност, атмосферно налягане, скорост на вятъра, облачност, валеж, географски координати (ширина, дължина, надморска височина) и синусоидални сезонни признаци (3).

(3) $$\sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right), \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right), \cos\left(\frac{2\pi m}{12}\right)$$

Преди обучението на модела данните преминават през няколко етапа напредобработка:

1. Почистване на липсващи стойности чрез интерполация;
2. Нормализация и скалиране до 0–1;
3. Създаване на лагови признаци;
4. Разделяне на тренировъчен и тестов набор по време.

За да се моделира инерцията на температурните процеси, са въведени лагови признаци (4).

(4) $lag3=T_{(t-3h)}, lag6=T_{(t-6h)}, lag12=T_{(t-12h)}$

Те са особено ефективни при краткосрочни прогнози и подобряват точността на модела с над 10%.

Обучение и прогнозиране

Моделът е обучен с:
N = 400 решаващи дървета, максимална дълбочина D = 20, минимален брой проби за разделяне min_samples_split = 5. Данните са разделени времево за обучение исторически период до 2023 г.; тест — след 2023 г.

След обучението се извършва прогноза за 72 часа напред (3 дни). За първия ден се използват реални измервания от последните 24 часа, а за втория и третия — усреднени сезонни стойности по град, месец и час.

Метрики за оценка

В оценяването на прогностичните модели ключово значение имат статистическите метрики, които измерват отклонението между прогнозираните и наблюдаваните стойности. Избраните показатели в настоящото изследване — MAE, MSE и RMSE — са сред най-широко използваните в приложната метеорология и численото моделиране [3].

Средна абсолютна грешка (MAE) (5)

(5) $MAE=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left|y_j-\hat{y_j}\right|$

MAE измерва средната абсолютна стойност на разликата между прогнозната температура и реалната наблюдавана температура. Тя предоставя директна и интуитивна интерпретация на грешката, изразена в °C.

При Варна и връх Ботев, MAE е под 2°C за 24–72 часа, което показва изключително добра прогностична точност.

При Пловдив MAE е по-висока, което се дължи на по-резките температурни амплитуди в континенталната част.

Квадратен корен от средноквадратична грешка (RMSE) (6)

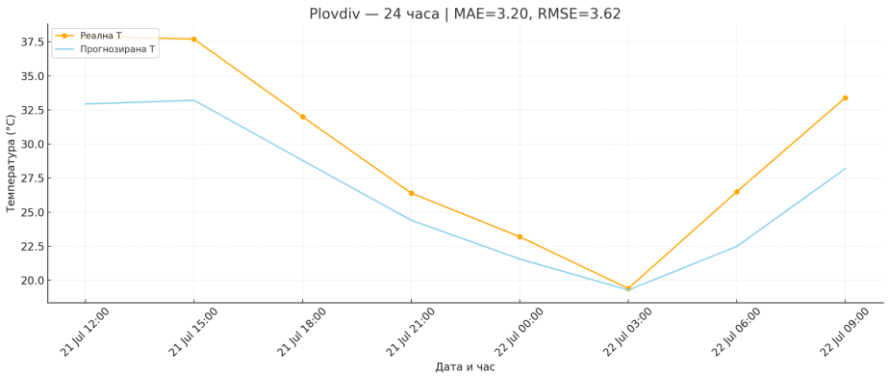
(6) $RMSE=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\left(y_j-\hat{y_j}\right)^2}$

RMSE е по-чувствителна към големи отклонения в сравнение с MAE, тъй като изчислява квадратния корен от средната стойност на квадратите на грешките. При анализираните локации RMSE също е най-ниска при морските и планински станции и най-висока във вътрешността на страната.

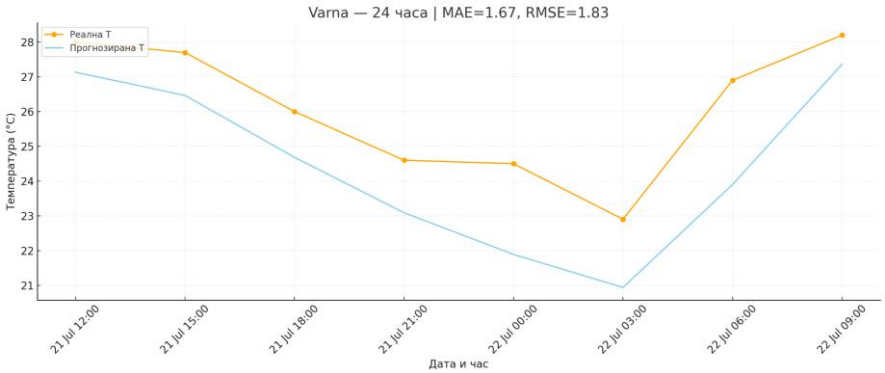
Разликата между RMSE и MAE е малка, което показва липса на сериозни пикови грешки и стабилност на модела. След 48 часа се наблюдава очаквано увеличение на грешките, тъй като с удължаване на хоризонта нараства неопределеността. Грешките при метеорологични процеси нарастват експоненциално с времето поради тяхната хаотична природа.

Четирите графики по-долу илюстрират поведението на модела в различни географски и климатични условия:

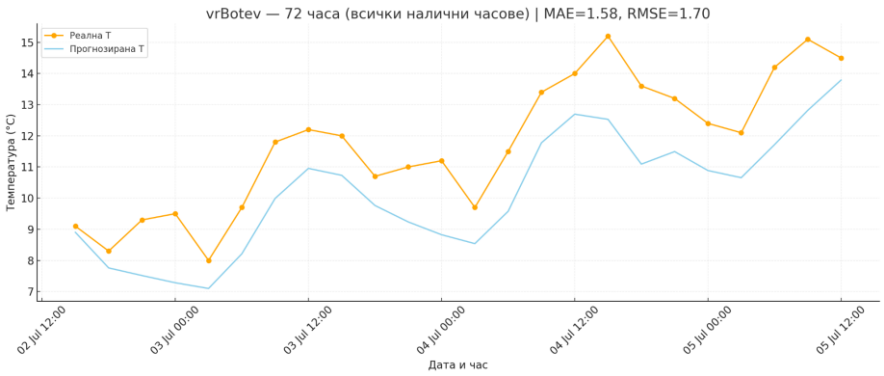
- Пловдив (24 h) — вътрешен град с по-резки температурни амплитуди (фиг. 2);
- Варна (24 h) — морски климат, плавна температурна крива и ниски грешки (фиг. 3);
- вр. Ботев (72 h) — планински връх, стабилно поведение и отлична точност (фиг. 4);
- София (72 h) — вътрешен град с по-динамичен температурен ход и по-високи грешки (фиг. 5).



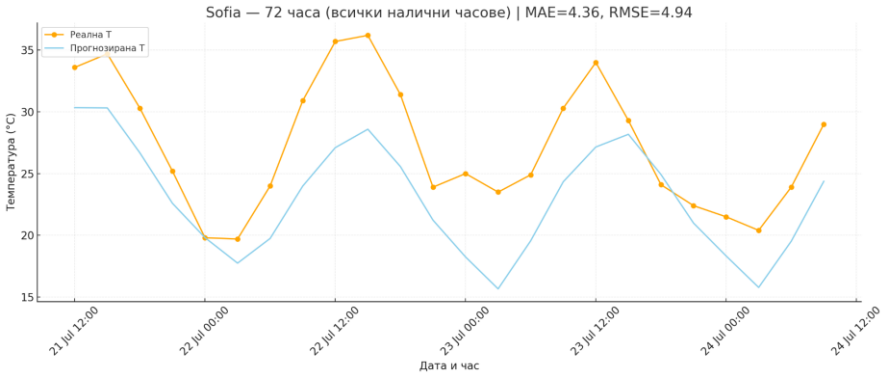
Фиг. 2.



Фиг. 3.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

Обобщение на резултатите:

- Точност в рамките на ±2 °C ≈ 91%;
- По-големи отклонения след 48 часа, особено във вътрешността на страната;
- Много добро представяне при морски и планински станции.

Обсъждане на резултатите

Моделът се представя по-добре при крайбрежни станции, където температурните амплитуди са по-ниски и по-плавни. В континенталните райони грешките се увеличават поради по-силно изразени дневни колебания и локални ефекти на релефа. Добавянето на координати и надморска височина подобрява общата стабилност.

Както е показано в предишни числени симулации, промените в температурния профил и концентрацията на CCN оказват съществено влияние върху микрофизиката и динамиката на конвективните облаци [7]. Това частично обяснява по-големите отклонения на прогнозите във вътрешността на страната, където дневните амплитуди са по-изразени.

Числените модели за прогнозиране на времето (NWP) са изключително точни при наличие на суперкомпютърни ресурси. Те обаче изискват огромни обеми данни, сложни физически схеми и значително време за изчисления. Моделът Random Forest, от друга страна, има много по-ниски изчислителни изисквания и дава точни краткосрочни прогнози.

Заключение

Разработеният модел на базата на Random Forest регресия показва, че:

- Машинното обучение е ефективен инструмент за краткосрочна прогноза на температура;
- Моделът може да се обучава бързо и да дава резултати с висока точност без нужда от суперкомпютър;
- Подходът е приложим в реално време и може да бъде интегриран като допълнение към съществуващи прогностични системи.

В бъдещи разработки може да се разгледа интеграция на IWV, извлечен от Глобални навигационни сателитни системи (GNSS), като входна променлива. Подобни подходи са показали добри резултати при анализ на мъгли и нестабилност и могат да осигурят по-богато представяне на влаговия режим в атмосферата, което е критично за температурните прогнози [8].

Комбинирането на статистически модели с данни от числени прогностични системи като ALADIN може да повиши точността на прогнозите, особено при нестабилни атмосферни условия [9]. Това отваря възможности за хибридни подходи между ML и NWP.

Моделът може да бъде внедрен в редица практически системи:

- Енергетика — прогнозиране на пикови натоварвания;
- Здравеопазване — предупреждение за топлинни вълни;
- Земеделие — оптимизация на времето за сеитба;
- Транспорт — оценка на риска от обледяване;
- Климатични услуги — локални прогнози чрез API и мобилни приложения.

Литература:

1. L. Breiman, “Random forests”, Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001. doi: 10.1023/A:1010933404324
2. D. S. Wilks, Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 3rd ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2011. ISBN: 978-0-12-385022-5
3. S. Rasp, P. D. Dueben, S. Scher, J. A. Weyn, S. Mouatadid, and N. Thuerey, “WeatherBench: A benchmark dataset for data driven weather forecasting”, Journal of Advances in Modeling Earth Systems (JAMES), vol. 12, no. 11, e2020MS002203, 2020. doi: 10.1029/2020MS002203
4. T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2009. ISBN: 978-0-387-84857-0
5. B. Tsenova, R. Mitzeva, and C. Saunders, “Parametrisation of thunderstorm including the cloud saturation effect”, Atmospheric Research, vol. 96, no. 3, pp. 356–365, 2010. doi: 10.1016/j.atmosres.2009.09.012
6. Andonov F., Petrov G. Weather station for smart home applications. Journal – Electrotechnica & Electronica (E+E), Vol. 52 (11-12), 2017, pp. 27–31, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603-5421 (Online)
7. B. Tsenova, R. Mitzeva, and A. Brandiyska, “Effect of CCN and temperature profile changes on convective cloud microphysics and dynamics – numerical simulations with 1.5 D cloud model”, Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology, submitted, 2012
8. A. Stoycheva and G. Guerova, “Fog case studies using GNSS tropospheric products in Bulgaria”, in FIG Working Week 2015: From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World, Sofia, Bulgaria, May 17–21, 2015
9. B. Tsenova and A. Bogatchev, “Evaluation of instability indices computed using ALADIN-BG output and their relation with thunderstorm activity over Bulgaria”, in Proceedings of the 16th International Conference on Clouds and Precipitation, Leipzig, Germany, Jul. 2012.

АНАЛИЗ НА МЕТЕОРОЛОГИЧНИ СВОБОДНО ДОСТЪПНИ ДАННИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВРЕМЕТО С ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ

Михаил Първанов

Национален институт по метеорология и хидрология (НИМХ),
студент бакалавърска програма „Информатика“ в Нов български университет
e-mail: mparvanovm@gmail.com

Ключови думи: *метеорологични данни, анализ на данни, изкуствен интелект*

Резюме: *Докладът представя модел за автоматично калибриране на данни от свободни и частни метеорологични станции. Чрез сравнение с официалните измервания алгоритъмът открива и коригира систематичните грешки, произтичащи от различия в хардуера, монтажните условия и локалната среда. По този начин се повишава точността и пространствената резолюция на наблюденията, което създава по-надеждна основа за изграждане на прогностични и аналитични модели в метеорологията и съществено подобрява локалните краткосрочни прогнози. Това е от особена важност за земеделието, градската управа и координация на действия свързани с системите за защита от градушки.*

ANALYSIS OF METEOROLOGICAL OPEN DATA FOR AI-BASED FORECASTING

Mihail Parvanov

National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH), undergraduate student in the “Informatics” Bachelor’s program at New Bulgarian University
e-mail: mparvanovm@gmail.com

Keywords: *meteorological data, data analysis, artificial intelligence*

Abstract: *The report presents a model for automatic calibration of data from open and private weather stations. By comparing sensor readings with official measurements, the algorithm detects and corrects systematic errors arising from differences in hardware, installation conditions, and local environments. This process increases the accuracy and spatial resolution of observations, providing a more reliable basis for building predictive and analytical models in meteorology and significantly improving local short-term forecasts. The approach is particularly important for agriculture, urban management, and the coordination of operations related to hail protection systems.*

Въведение

Свободните и частни метеорологични станции предоставят ценна, но по правило некалибрирана информация, много от тях имат отворена архитектура, което позволява модификация на фърмуера, и интеграция със системи то по-високо ниво. В този процес техните собственици са отворени и биха оказали нужното съдействие, за да осигурят максимална калибрация и достоверност на получаваните данни. Те имат висока пространствена плътност и могат да допълнят официалната наблюдателна мрежа, но техните измервания се различават от тези на станциите на НИМХ поради различия в хардуера, височината на монтаж, градската среда и липсата на регулярна калибрация. Повечето създатели разчитат на заводската калибрация на сензорите, но нямат нито умения нито знания да развият този процес във времето. Целта на изследването е разработване на концептуален модел за автоматично калибриране, като по този начин се осигурява тяхната съпоставимост и надеждност.

Метеорологичните данни представляват ключов елемент в процеса на прогнозиране, управление на климатични рискове и на дългосрочни прогнозтични модели касаещи

земеделието и туризма. Наличните модули и модели позволяват изготвяне на краткосрочни прогнози, за анализ на дългосрочни тенденции, свързани с изменението на климата са необходими повече пространствени данни. Ефективното използване на тези данни дава възможност за изграждане на системи за ранно предупреждение при екстремни явления като наводнения, засушавания и бури.

Съвременните подходи в областта на метеорологията включват интегриране на данни от различни източници — наземни станции, сателити, радари и мобилни сензори. Комбинирането на тези потоци от данни позволява създаването на богати, многомерни информационни масиви, подходящи за обработка чрез алгоритми на изкуствения интелект и машинното обучение.

Настоящото изследване има за цел не само да представи статистически анализ на наличните данни, но и да демонстрира значението на предварителната им обработка и инженерството на признаци при изграждането на ефективни прогностични модели.

Климатичните промени и необходимостта от по-надеждни прогнози изискват разработването на устойчиви системи, базирани на висококачествени, дългосрочни и калибрирани данни. Това изисква огромно количество централизирани инвестиции в изграждане на инфраструктура, но и създава предпоставки за използването на отворени модели, които вече са инсталирани и интегрирани в множество системи. В България съществува добре развита мрежа от метеорологични станции, предоставящи данни с висока времева резолюция, която — в комбинация с данните от свободните сензори — може да формира основата на ново поколение AI-базирани прогностични системи.

Данни и методология

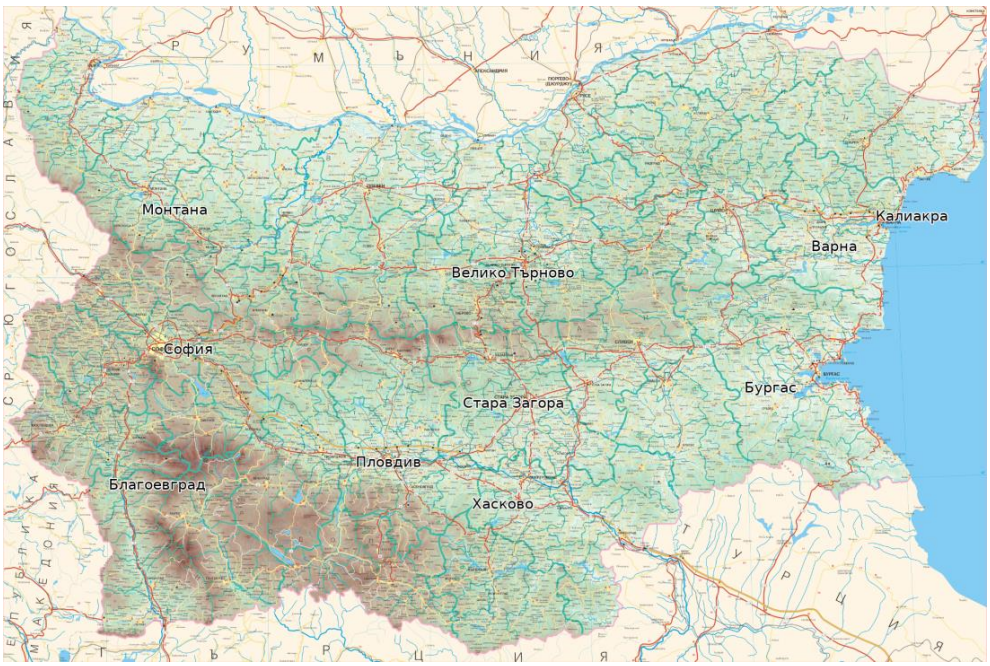
Изследването използва предварително обучен модел с данни от националната мрежа метеорологични станции на територията на България, обхващащи периода 1991–2025 г. Измерванията са извършвани на тричасови интервали, което позволява детайлно проследяване на динамиката на основните атмосферни параметри.

Основните използвани променливи са:

- Температура на въздуха (°C)
- Валежи (mm)
- Скорост и посока на вятъра (m/s, °)
- Относителна влажност (%)
- Атмосферно налягане (hPa)

Преди анализа данните преминават през процес на предварителна обработка, включващ:

- премахване на липсващи и некоректни стойности;
- хармонизиране на времевите формати;
- филтриране на шум и аномални отклонения;
- пространствено обвързване с географските координати и надморската височина на станциите.



Фиг. 1. Разпределение на станции

Мрежата от станции (фиг. 1) е разположена равномерно в различни климатични и географски зони, което осигурява представителност на данните. Това пространствено покритие е от съществено значение за моделиране на локални особености и микроклиматични ефекти. Планинските станции предоставят важна информация за вертикалните температурни градиенти и влиянието на надморската височина върху валежите и влажността — фактори, които са решаващи при прогнозиране на явления като интензивни снеговалежи и мъгли.

Времеви зависимости и нелинейности

Метеорологичните данни са силно зависими както от времето, така и от пространството, което позволява да се представят във времеви редове с нелинейни взаимовръзки. За да се улови тази динамика, в набора от данни се добавят лагови (закъснели) стойности и сезонни компоненти, които позволяват на алгоритмите да разпознават периодични цикли и краткосрочни тенденции. Подобен подход е особено ефективен при използване на невронни мрежи и модели за последователности като *LSTM* и *GRU*, които могат да обработват зависимости във времето, но и се захранват постоянно с множество реални данни.

Нелинейната природа на атмосферните процеси изисква прилагането на гъвкави модели, които да улавят сложните взаимодействия между температура, налягане, вятър и влажност. Комбинирането на тези параметри в общи предсказващи функции и включването на калибрирани данни от различни източници води до по-точни и устойчиви прогнози, особено в локален мащаб при липса на достатъчно данни, каквито са радарни и сателитни изображения.

Приложения на изкуствения интелект в метеорологията

Изкуственият интелект (AI) намира все по-широко приложение в метеорологията, като допълва традиционните числени методи за прогнозиране. Алгоритмите за машинно обучение могат да извличат закономерности от големи обеми данни и да улавят сложни зависимости, които често остават скрити за класическите статистически модели. Важно е да се отбележи че те не бива директно да бъдат заместени, но могат да се ползват локално, като матрици, които да бъдат ползвани от множество устройства разположени на голяма географска територия.

AI се прилага успешно в следните направления:

- Краткосрочни прогнози с висока пространствена и времева резолюция;
- Идентифициране на екстремни явления, като бури, градушки и интензивни валежи;
- Дългосрочно климатично моделиране и анализ на тенденции;
- Интеграция на хетерогенни източници на данни – сателити, радари, станции и мобилни сензори;
- Оценка на риска при природни бедствия, свързани с времето.

Комбинирането на свободни и частни наблюдения, след корекция чрез модел за калибрация, разширява пространственото покритие и обогатява входните данни за AI алгоритмите. Това позволява изграждането на прогностични системи, които са едновременно по-гъвкави, по-точни и по-адаптивни към локалните условия. Това ги прави подходящи за нуждите на земеделието.

За повишаване на точността на прогностичните модели се извършва инженеринг на признаци — създаване на нови, информативни параметри от наличните данни. Такива признаци включват:

- Закъснели стойности (lag features) – за улавяне на динамиката и инерцията на атмосферните процеси;
- Сезонни компоненти и индекси – за моделиране на годишните цикли и климатичната периодичност;
- Комбинирани фактори – като температурно-влажностни и налягане-вятър зависимости, които улавят нелинейните взаимодействия между параметрите.

Инженерство на признаци и адаптивност на модела

Класическото представяне на сезонността чрез адитивни хармонични функции предполага стабилна и симетрична годишна цикличност. В условията на съвременния климат се наблюдават разместванията по фаза и промени в амплитудата и продължителността на сезонните преходи. Това води до нарушаване на традиционната периодичност, поради което стандартните хармонични модели вече не описват адекватно реалните климатични процеси.

За по-реалистично улавяне на сезонните и краткосрочните колебания се прилагат времезакъснителни и изпреварващи модели, при които даден параметър (напр. температура или влажност) се изразява не само чрез своите минали стойности, но и чрез прогнози за бъдещи тенденции, извлечени от локални зависимости. По този начин моделът става чувствителен към несинхронни сезонни сигнали — като аномално топли зими или ранни пролетни затопляния.

За откриване на непериодични и скокови промени се използва уейвлет анализ, който позволява разлагане на времевия ред по честоти и засичане на локални изменения в сезонната структура. За разлика от класическите хармонични редове, уейвлетите описват динамични и променливи цикли, което ги прави подходящ инструмент за анализ на нестационарни атмосферни процеси.

В контекста на изменящия се климат е възможно да се проявяват бифуркационни поведения – резки преходи в режима на атмосферната система при достигане на определен праг (например внезапно застудяване или активиране на конвективни процеси). За описване на подобни нелинейни преходи се използват ансамблови модели на градиентно бууствane, като Gradient Boosting Regressor, XGBoost и LightGBM, които са способни да моделират сложни зависимости и взаимодействия между входните променливи.

Бифуркационните индикатори се въвеждат като допълнителни управляващи входове, чрез които моделът адаптивно регулира своите вътрешни коефициенти и тегла в зависимост от степента на динамична нестабилност в системата, детектирана за реален предишен времеви ред, касаещ точната прогноза сега. По този начин се реализира контролирано преминаване между различни прогностични режими, което повишава стабилността и точността на модела при екстремни събития.

Комбинирането на уейвлет анализ (за детекция на локални промени), градиентно бууствane (за нелинейно обучение) и бифуркационно управление (за адаптация в реално време) създава мощна основа за изграждане на динамични AI модели, способни да реагират на променящите се атмосферни режими и да поддържат висока прогностична надеждност дори при нестабилни климатични условия. Поради тази причина анализът на локалните аномалии е от съществено значение, което налага агретацията на множество данни, дори и такива от некалибрирани сензори, тъй като отчитаме локалните градиенти на параметрите, а не точните стойности.

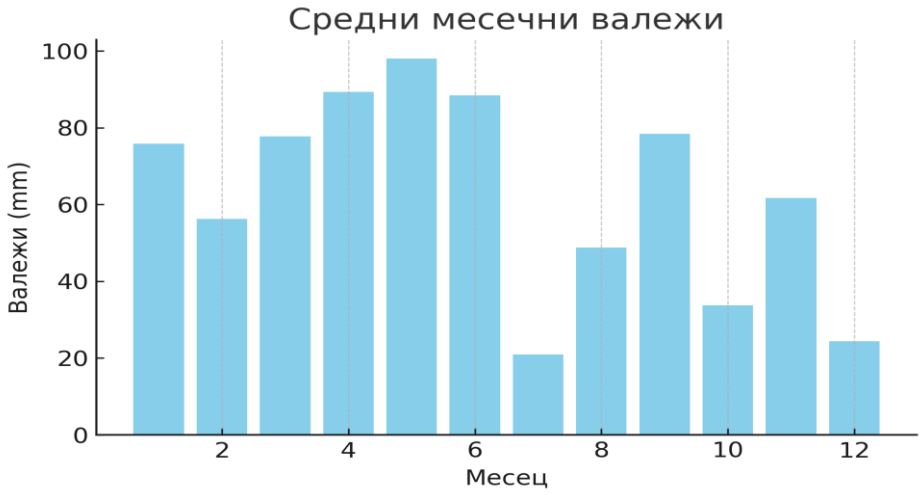
Комбинацията от уейвлет анализ, времеви лагове и бифуркационно управление формира адаптивен подход за извличане и актуализиране на признаци, който не разчита на фиксирана сезонност, а следва реалната еволюция на атмосферните процеси. Така се изграждат по-гъвкави и устойчиви AI модели, способни да реагират на преходи между климатични режими и да поддържат висока прогностична точност при променяща се среда.

Анализ и резултати

Анализът показва ясно изразена сезонност в температурата и валежите. Средногодишната температура варира от 6 °C в планинските райони до 14 °C в южните. Валежите са най-високи през месеците май и юни. Наблюдава се и обща тенденция на затопляне от 1.2 °C за последните 40 години.

Фиг. 2. Средногодишна температура по години

Наблюдава се отчетлив възходящ тренд в средногодишната температура (фиг. 2) за периода 1980–2024 г., който е в синхрон с глобалните климатични тенденции. Тази информация е изключително ценна при създаването на модели за прогнозиране на климатични промени. Вижда се, че вариациите в температурата не са линейни — има периоди на по-бързо покачване и стабилизация. Такива характеристики трябва да се вземат предвид при създаването на модели за времеви редове.



Фиг. 3. Средни месечни валежи

Видно е ясно изразено увеличение на валежите (фиг. 3) през пролетните и началото на летните месеци, което е характерно за умерения климат в България. Тази сезонност е от особено значение при моделиране на водни ресурси, селско стопанство и хидрологични процеси. По-високите стойности на валежите през определени месеци могат да бъдат комбинирани с информация за температура и влажност, за да се създадат комплексни индикатори, които подобряват точността на прогнозните модели.

Заключение

Изследването подчертава значението на висококачествените, дългосрочни метеорологични данни като основа за надеждни AI прогнози. В бъдеща работа се предвижда разширяване на набора от станции, използване на дълбоки невронни мрежи и климатични сценарии до 2050 г. Настоящото изследване представя детайлен анализ на пространственото разпределение на ключови български градове върху политическа карта на страната, използвайки реални географски координати за тяхната точна локализация. Чрез визуализацията на градове като София, Пловдив, Варна, Бургас, Велико Търново, Благоевград, Хасково, Монтана, Калиакра и Стара Загора се постига ясно разбиране за тяхното географско разположение спрямо основните геофизични и инфраструктурни особености на България. Подобен подход предоставя прецизна и лесна за интерпретация информация, която е особено ценна в контекста на метеорологични изследвания, климатично моделиране и създаване на AI-базирани системи за прогнозиране.

Точната географска привързаност на тези локации има съществено значение за коректното интерпретиране на наблюдателни данни от метеорологични станции и за оптималното им интегриране в модели за числено прогнозиране на времето. Например, местоположенията на крайбрежните градове (като Варна, Бургас) са ключови при анализ на морски и климатични влияния, докато вътрешните градове (София, Пловдив и Велико Търново) позволяват по-добро разбиране на континенталните ефекти и орографското въздействие. Освен това, визуалното позициониране на тези градове върху карта с политически и географски контур е важен елемент при разработването на обучителни и прогнозни модели, които разчитат на точни входни параметри. Това има пряко приложение не само в метеорологията, но и в области като управление на природни ресурси, градско планиране, анализ на климатични рискове и кризисен мениджмънт.

В заключение, изготвянето на географски точни карти с ключови градски точки не е просто визуална помощ, а съществен компонент от изграждането на надеждни и прецизни научни и практически системи. В бъдещи разработки подобни визуализации могат да бъдат обогатени с допълнителни слоеве данни — като топографски, климатични и инфраструктурни — което ще позволи още по-задълбочени анализи и моделиране на сложни природни процеси.

Литература:

1. Warner, T. T. (2010). Numerical Weather and Climate Prediction. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-51389-0
2. Santurette, P., & Georgiev, C. (2005). Weather Analysis and Forecasting: Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis. Academic Press. ISBN 978-0-12-619262-9
3. Camps-Valls, G., Tuia, D., Zhu, X. X., & Reichstein, M. (2021). Deep Learning for the Earth Sciences: A Comprehensive Approach to Remote Sensing, Climate Science and Geosciences. Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-119-64618-6
4. De Smith, M. J., Longley, P. A., & Goodchild, M. F. (2023). Geospatial Analysis (7th ed.). Winchelsea Press. ISBN 978-1-908-44213-3
5. Jensen, J. R. (2019). Remote Sensing and GIS for Meteorology. CRC Press. ISBN 978-1-138-35764-0
6. Westra, E. (2015). Python Geospatial Development (2nd ed.). Packt Publishing. ISBN 978-1-78328-113-8
7. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2024). Reanalysis and Forecast Datasets. Retrieved from https://www.ecmwf.int
8. World Meteorological Organization (WMO). (2024). Global Observing System and Guidelines. Retrieved from https://public.wmo.int
9. NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI). (2024). Global Climate Data. Retrieved from https://www.ncei.noaa.gov
10. European Environment Agency (EEA). (2024). Geospatial Climate Data for Europe. Retrieved from https://www.eea.europa.eu
11. National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH). (2024). Национални климатични архиви. Retrieved from https://www.meteo.bg
12. НИМХ – БАН. (2015). Климатичен атлас на България. София: Национален институт по метеорология и хидрология – БАН. ISBN 978-954-8889-54-3.

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ДРОНОВЕ ПРИ ИЗСЛЕДВАНЕ НА АТМОСФЕРНИ ЗАМЪРСЯВАНИЯ

Мария Димитрова, Гаро Мардиросян, Стефан Шопов

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

Ключови думи: *дистанционни изследвания, атмосферно замърсяване, дронове*

Резюме: *В работата са разгледани перспективите за използване на дронове при изследвания на атмосферни замърсявания на места, където липсват АИС, при изследване на разпространението на замърсителите във височина, при епизодични явления в труднодостъпни места и др.*

POSSIBILITIES FOR USING DRONES IN RESEARCHING OF ATMOSPHERIC POLLUTION

Maria Dimitrova, Garo Mardirossian, Stefan Shopov

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

Keywords: *remote sensing, air pollution, drones*

Abstract: *The work examines the prospects for using drones in atmospheric pollution studies in places where AIS are lacking, in studying the distribution of pollutants at altitude, in episodic phenomena in hard-to-reach places, etc..*

Въведение

Нивото на замърсяване на въздуха се определя както от емисиите на замърсители, така и от дисперсионните процеси в атмосферата. В повечето случаи атмосферата се самопречиства, но в някои случаи на постоянно емитиране на съответния замърсител.

Основните неблагоприятни метеорологични условия, предпоставка за натрупване на замърсители в приземния слой на атмосферата са: ниска скорост на вятъра (по-малка от 1,5 m/s) и устойчива стратификация (слаба турбулентност и съответно слабо вертикално смесване). Температурните инверсии и устойчивата стратификация на атмосферния граничен слой създават условия на застой, водещи до ограничаване на разсейването на замърсители във въздуха, и следователно до по-високи концентрации.

Влажността на въздуха е параметър, който влияе върху разпространението на прахови замърсители и играе важна роля в образуването на киселинни аерозоли. По-високата влажност води до хидратирането на някои замърсители и преобразуването им в нови токсични съединения.

Друг важен фактор влияещ на качество на въздуха е релефът. Той може да служи като стена възпрепятстваща замърсените въздушни маси да напуснат района. Често застроените зони също блокират вентилацията и задържат замърсения въздух близо до земята.

Трансграничното замърсяване на въздуха е свързано със замърсители от източници на емисии намиращи се далече, както от естествен (прах от Сахара, горски пожари, изригване на вулкани и др.), така и от антропогенен произход (топлоцентрали на твърдо гориво, открити рудници, каменоломни и др.). Някои от емитираните замърсители могат да претърпят различни химически трансформации по време на преноса им от въздушните маси, докато други се

транспортират като пасивни вещества, но и в двата случая, могат да засегнат градове и райони, доста отдалечени от мястото, от което произхождат [1].

Замърсителите на въздуха могат да имат естествен (биогенен), антропогенен или смесен произход, в зависимост от техните източници или източниците на техните прекурсори1 . Те са категоризирани като първични или вторични. Първичните замърсители се отделят директно в атмосферата, докато вторичните се образуват при взаимодействие с други вещества (прекурсори) чрез химични реакции и микрофизични процеси. Първичните замърсители на въздуха са фини прахови частици (ФПЧ), черен въглерод (ЧВ), серни оксиди (SOx), азотни оксиди (NOx) (включващи както азотен оксид (NO), така и азотен диоксид (NO_2)), амоняк (NH_3), въглероден оксид (CO), метан (CH_4), неметанови летливи органични съединения (НМЛОС), включително бензен (C_6H_6), някои метали и полициклични ароматни въглеводороди (ПАВ), включително бензо[а]пирен (БаП). Вторично образуваните замърсители на въздуха са ПЧ (образувани в атмосферата от SO_2, NOx, NH_3 и ЛОС), озон (O_3), NO_2 и няколко летливи органични съединения (ЛОС). Някои НМЛОС се окисляват, образувайки по-малко летливи съединения, които от своя страна образуват вторични органични аерозоли. Приземният (наричан още тропосферен) озон не се отделя директно в атмосферата, а се формира от взаимодействието на други замърсители (метан, азотни оксиди) със слънчевата светлина.

Праховите частици, азотният диоксид и приземният озон са общопризнати в днешни дни като трите замърсителя, които влияят в най-голяма степен върху човешкото здраве. Продължителното излагане на високи нива от тези замърсители варира по тежест на въздействието от увреждане на дихателната система до преждевременна смърт. Около 90% от жителите на градовете в Европа са изложени на концентрации, по-високи от нивата считани за вредни за здравето [1]. По тази причина в Европейски мащаб се работи за намаляване на вредните емисии в атмосферата. Изготвен е и План за действие на ЕС: „Към нулево замърсяване на въздуха, водата и почвата“ [2].

Традиционни методи за регистриране на атмосферните замърсители

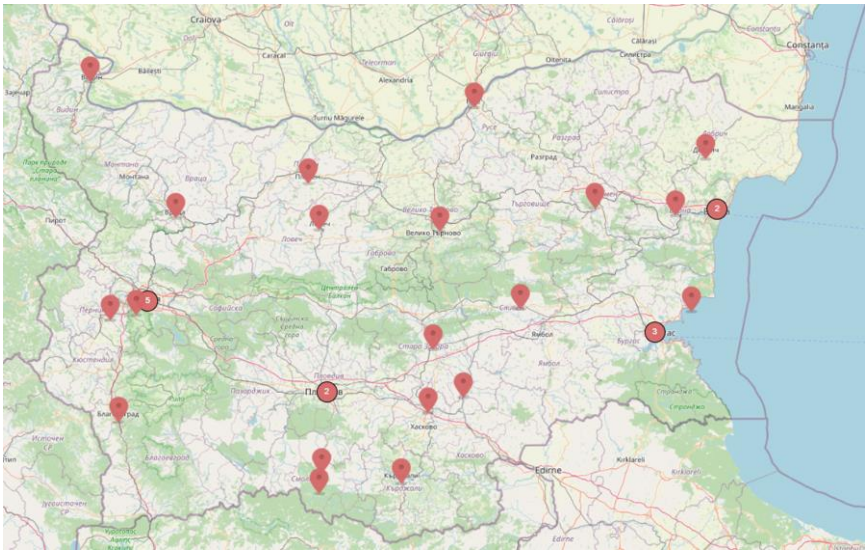
Традиционно, нивата на замърсяване на въздуха се измерват посредством автоматични измервателни станции от земята или чрез използване на спътникови данни.

Националната автоматизирана система за контрол качеството на въздуха се състои от 50 стационарни пункта, в т.ч. 34 автоматични измервателни станции (АИС), 9 пункта с ръчно пробонабиране и последващ лабораторен анализ и 7 автоматични ДОАС системи. Пунктовете за контрол качеството на атмосферния въздух (КАВ) са разположени в 34 населени места. Информацията за състоянието на атмосферния въздух от всички пунктове за мониторинг постъпва в централен диспечерски пункт в ИАОС. На локално ниво информацията постъпва в регионални диспечерски пунктове, разположени в съответните РИОСВ [3].

Данните за отделните замърсители се предоставят на средночасова, дневна или годишна база. Могат да бъдат получени в табличен вид от няколко източника:

- за периода 2015 до сега от системата КАВ [4];
- за периода 2013 до сега – от Европейския портал за качеството на въздуха [5].

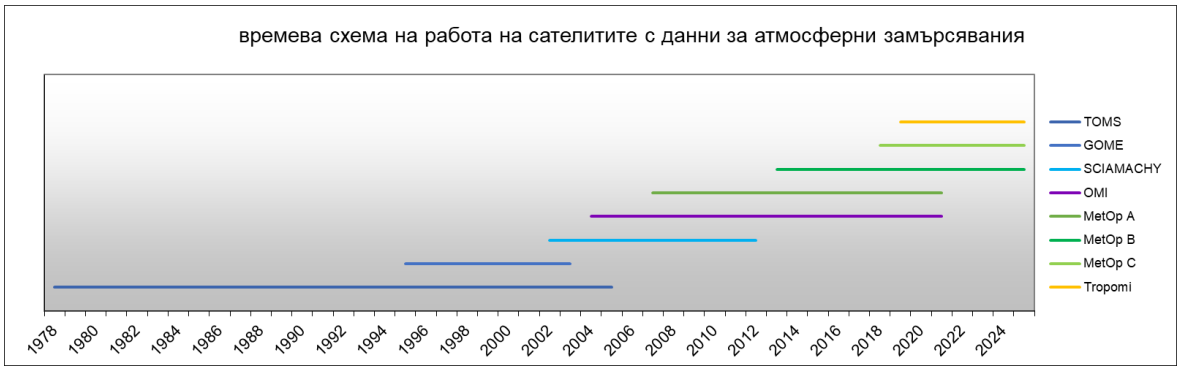
На фиг. 1 е представено разположението на АИС в България [4].



Фиг. 1. Разположение ма АИС на територията на България

Основен недостатък на изследването на атмосферното замърсяване посредством АИС е малкият им брой и факта, че данните от тях са валидни само за малък район в близост до точката, където е разположена съответната измервателна станция.

Другият основен източник на данни за атмосферните замърсители са сателитните измервания. Такива измервания се правят от дълго време. На фиг. 2 е представена схематична графика за периодите на предоставяне на свободни данни от основните инструменти [6]



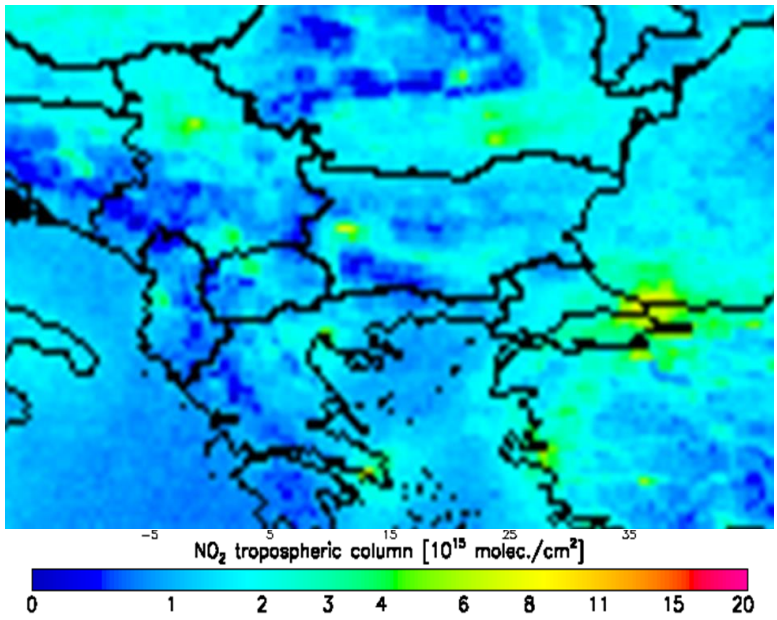
Фиг. 2. Разположение на АИС на територията на България

Както се вижда от фиг. 2, данни за атмосферни замърсители, при това свободни за ползване, има от по-дълъг период, отколкото има такива от АИС. Тези данни, обаче, имат няколко съществени недостатъка.

На първо място, данните за различни периоди са от различни инструменти и, съответно, трудно могат да бъдат използвани заедно.

На второ място, данни се получават от всяко едно прелитане на сателита над определена територия, което рядко е повече от веднъж на ден.

На трето място стои ниската пространствена разделителна способност на тези данни – обикновено около 50 km^2 за по-старите инструменти и около 5 km^2 за данните от Sentinel 5P – инструмент Tropomi. На фиг. 3 е показан пример за типично разпределение на NO_2 над България по данни от Tropomi [6].



Фиг. 3. Пример за средномесечно разпределение на NO2 над България – януари 2024 г.

На четвърто, но не и на последно по важност място стои факта, че сателитните измервания предоставят данни за съдържанието на даден замърсител в цялата колона над определения регион (единици на m^2), докато важна от екологична гледна точка е обемната концентрация (единица на m^3).

Мястото на дроновете за регистриране на атмосферните замърсители

През последните години все по-често навлизат измервания с дронове за места, където няма разположени АИС [7, 8, 9, 10]. Това е една свободна ниша за получаване на информация за качеството на атмосферния въздух на места, до където няма свободен достъп за разполагане на стационарни АИС, случаите на атмосферни замърсявания са епизодични или достъпът до територията е ограничен от географското му разположение.

Един пример за такъв тип дронове е Дронът за околна среда. Това по същината си е въздушна роботизирана система, проектирана да получава автоматично подходящи метеорологични данни, особено данни за AQHI – индекс за качеството на атмосферния въздух, на определена станция или място. Е-дронът има базова станция на мястото, където трябва да се събират данни за околната среда. Базовата станция се състои от компактен слънчев панел със захранващи връзки, разположени отстрани, за да осигуряват непрекъснато захранване на дрона между събирането на метеорологични данни [8]. Всяка от концентрациите на замърсители на въздуха се измерва в системата E-drone от отделни и различни сензори. В конкретния случай [8] се измерват концентрациите на CO_2, CO, NH_3, SO_2, PM, O_3 и NO_2.

Съвместното използване на спътникови и наземни данни дава една много по-пълна картина на разпространението и динамиката на атмосферните замърсявания. За получаване на общи количествени оценки, обаче са необходими някои калибрирания и модел на разпространението на даден замърсител във височина.

Именно тук авторите виждат и основната роля на измерването на атмосферните замърсители с помощта на дрон или система от дронове. Една система за получаване на данни, които могат да бъдат използвани за изграждането на модел на разпространението на отделните замърсители във височина би следвало да бъде изградена по следния начин.

- Измервания трябва да се направят на място над (или в непосредствена близост до) работеща АИС.
- Трябва да бъдат направени измервания на различни височини над една и съща точка
- Измерванията на височината, ма която е разположена съответната АИС да се калибрират спрямо измерените от последната стойности.
- Да се направят измервания и в момент на прелитане на съответен сателит над избраното място за да може да се получи съответствие между обемната концентрация, измерена на земята и площната такава, измерена от инструмента на сателита.

Дроновете могат да бъдат използвани и за получаване на карта на разпространението на даден атмосферен замърсител над определен обект. Такъв обект могат да бъдат регламентираните и нерегламентирани сметища за битови отпадъци, както и депата за опасни отпадъци.

Един от основните източници на замърсяване с NO_2 е автомобилният трафик. Както се вижда от фиг. 3, по протежение на автомагистрала Тракия се наблюдава повишаване на концентрацията на този замърсител. Сравнявайки фиг. 3 с фиг. 1 виждаме, че измервания от АИС има в градовете София и Пловдив, но не и по трасето между тях. Регулярното облитане с дрон над даден участък би могло да бъде използвано за количествена оценка на нивото на това замърсяване, както и на ареала на неговото разпространение.

Заключение

В заключение можем да отбележим че правилното съвместно използване на данни от различни източници дава възможност както за регистрирането на атмосферни замърсители, така и за разбирането и моделирането на тяхното разпространение.

Дроновете са едно съвременно, сравнително евтино и достъпно средство за получаване на допълнителна информация и свързващо звено за калибриране на измерванията от различни източници и моделиране на пространственото разпространение.

Литература:

1. Емилия Георгиева, Елена Христова, Татяна Спасова, Севдалина Войнова, Справочник за замърсяването на въздуха за различни заинтересовани страни, Декември 2020, Urban Innovative Actions, Les Arcuriales, 45D rue de Tournai, F59000 Lille, France www.uia-initiative.eu, https://innoair-sofia.eu/images/documents/documents-bg/D413-Guidebook_BG-publ.pdf
2. План за действие на ЕС: „Към нулево замърсяване на въздуха, водата и почвата“, {SWD(2021) 140 final} – {SWD(2021) 141 final} – https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400
3. Столична община, Национална автоматизирана система за контрол качеството на атмосферния въздух - https://airmon.sofia.bg/
4. КАВ - https://www.eea.government.bg/kav/
5. European Air Quality Portal – https://discomap.eea.europa.eu/Map/UTDViewer/UTDViewer/
6. Tropospheric Emission Monitoring Internet Service – TEMIS - https://www.temis.nl/
7. Murat Bakirci, Smart city air quality management through leveraging drones for precision monitoring, Sustainable Cities and Society, Volume 106, 2024, 105390, ISSN 2210-6707, https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105390, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067072400218X?casa_token=Za--jC1pdhgAAAAA:Qj3pj2ZAH_sfceJ2Q_h_IHIg8u46rO_r_LADXiUc2EWe9R3ZWT9Q1WcnERdFrH8y1i-k9zQ
8. Godall Rohi, O'tega Ejofodomi, Godswill Ofualagba, Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones, Heliyon A Cell Press Journal, Volume 6, Issue 1, e03252January 2020, *Open access, https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(20)30097-9#fig1*
9. Pochwała, S.; Gardecki, A.; Lewandowski, P.; Somogyi, V.; Anweiler, S. Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor—Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland. *Sensors* 2020, *20*, 3582. https://doi.org/10.3390/s20123582, https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3582
10. Nima Afshar-Mohajer, Chang-Yu Wu, Use of a drone-based sensor as a field-ready technique for short-term concentration mapping of air pollutants: A modeling study, Atmospheric Environment, Volume 294, 2023, 119476, ISSN 1352-2310, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119476, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231022005416

ADVANCED COMPUTATIONAL APPROACHES FOR DATA-DRIVEN AND INTELLIGENT MODELING OF ATMOSPHERIC PROCESSES

Dimitar Makariev, Plamen Trenchev

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

Keywords: *Earth Observation, Atmospheric Processes, Digital Twins, System Dynamics, Monte Carlo Simulation, Neural Networks, Extreme Learning Machines, Genetic Algorithms, Genetic Programming, Large Language Models*

Abstract: *A review of contemporary methods for the intelligent modelling and analysis of atmospheric processes has been conducted, with a focus on their application in the study of atmospheric pollution and the extraction of data for simulating atmospheric conditions and scenarios. Earth System Digital Twins (ESDTs) are defined and discussed as dynamic virtual replicas that can simulate and predict the development of atmospheric conditions. Approaches to modelling system dynamics to capture complex interrelationships and processes are presented. Monte Carlo simulations are employed to address uncertainties in 'what if' scenarios and risk assessment. The analysis covers genetic algorithms for model optimization, as well as genetic programming and symbolic regression for extracting interpretable dependencies in atmospheric data. The predictive accuracy and real-time efficiency of neural networks and extreme learning machines are compared. Additionally, the capabilities of large language models (LLMs) and multimodal base models — including those developed by NASA and IBM — for integrating heterogeneous Earth observation data into intelligent atmospheric analysis are examined. Together, these methods support the development of modern approaches to processing and interpreting data from satellite and ground-based observations.*

СЪВРЕМЕННИ МЕТОДИ ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО МОДЕЛИРАНЕ И АНАЛИЗ НА АТМОСФЕРНИ ПРОЦЕСИ

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: *Наблюдение на Земята, Атмосферни процеси, Дигитални близнаци, Системна динамика, Монте Карло симулация, Невронни мрежи, Машини за екстремно обучение, Генетични алгоритми, Генетично програмиране, Големи езикови модели*

Резюме: *Извършен е обзор на съвременни методи за интелигентно моделиране и анализ на атмосферни процеси, с фокус върху приложението им в изследването на атмосферното замърсяване и извличането на данни за симулация на атмосферни състояния и сценарии. Дефинирани и дискутирани са Дигиталните близнаци на Земната система (Earth System Digital Twins – ESDTs), разглеждани като динамични виртуални реплики, способни да симулират и прогнозират развитието на атмосферни условия. Представени са подходи за моделиране на динамиката на системи с цел улавяне на сложни взаимовръзки и процеси. За справяне с несигурности в „какво-ако“ сценарии и оценка на рискове са използвани Монте Карло симулации. Анализирани са генетични алгоритми за оптимизация на модели, както и генетично програмиране и символична регресия за извличане на интерпретируеми зависимости в атмосферните данни. Проведен е сравнителен анализ между невронни мрежи и екстремни машини за обучение по отношение на тяхната прогностична точност и ефективност в реално време. Освен това, обсъдени са възможностите на големите езикови модели (LLMs) и мултимодалните основни модели, включително разработените от NASA и IBM, за интегриране на хетерогенни данни от наблюдение на Земята в интелигентния атмосферен анализ. Колективно тези методи подпомагат развитието на съвременни подходи за обработка и интерпретация на данни от сателитни и наземни наблюдения.*

Introduction

Atmospheric processes including air quality dynamics, climate variability, and pollutant transport are inherently complex, nonlinear, and subject to significant uncertainties across spatial and temporal scales. Accurately modeling and forecasting these phenomena require advanced computational methodologies that integrate observational data with sophisticated modeling frameworks.

In this review, we synthesize recent progress in intelligent and data-driven approaches for atmospheric modeling, with a particular focus on methods that leverage Earth observation (EO) data from both satellite platforms and ground-based monitoring systems [1]. These methods address critical challenges such as integrating heterogeneous data sources, capturing complex interdependencies within the atmosphere, and dynamically adapting to evolving environmental conditions.

Over the past decade, rapid advancements in machine learning, high-performance computing, and data assimilation have substantially improved the scalability, precision, and interpretability of atmospheric models [2]. Neural networks (NNs), for example, have demonstrated high accuracy in applications such as storm trajectory prediction and cloud classification [3]. Large Language Models (LLMs)—such as NASA's Galileo and IBM's TerraMind now support multimodal EO data interpretation and natural language-based interaction [4, 5]. Meanwhile, Earth System Digital Twins (ESDTs) have emerged as next-generation platforms for multiscale simulation of phenomena such as aerosol transport, planetary boundary layer evolution, and climate impact assessment [1].

In parallel, system dynamics (SD) modeling offers a framework for understanding feedback-driven systems, while Monte Carlo simulations support probabilistic reasoning and uncertainty quantification in risk assessment [6]. For real-time applications, Extreme Learning Machines (ELMs) provide fast and efficient retraining capabilities, making them well-suited for dynamic atmospheric monitoring [7, 8]. Moreover, evolutionary computation techniques such as genetic algorithms (GAs) and genetic programming (GP) are being increasingly used to optimize model architectures and extract interpretable equations from observational data [9, 10].

This review presents a comprehensive overview of these methodologies including digital twins, system dynamics, Monte Carlo simulations, neural networks, ELMs, genetic algorithms, symbolic regression via genetic programming, and large language models highlighting their roles, interactions, and applications in intelligent atmospheric modeling. Conceptual diagrams are included throughout (see Sections 2.1, 2.2, and 7) to illustrate key components and synergies across methods.

Key Methods for Intelligent Atmospheric Modeling

1. Earth System Digital Twins

An **Earth System Digital Twin (ESDT)** is a dynamic and interactive digital representation of the Earth system that integrates observational data and numerical models to replicate past and current states, predict future scenarios, and simulate the impacts of hypothetical conditions [1]. ESDTs offer a unified framework for addressing "What-Now", "What-Next", and "What-If" questions by continuously assimilating data from satellite sensors (e.g., MODIS, AIRS, TROPOMI), ground-based monitoring networks, and model outputs [1].

Key characteristics of ESDTs include:

- **High-fidelity multi-source data integration**, enabling accurate and timely representation of atmospheric phenomena [1].
- **Multiscale modeling capabilities**, supporting applications ranging from global climate simulations to local air quality nowcasting [1].
- **Hybrid modeling approaches**, combining physics-based numerical models with machine learning emulators to enhance computational efficiency without compromising physical realism [1].In atmospheric applications, ESDTs have proven particularly valuable for modeling:
- **Planetary boundary layer (PBL) dynamics**, which influence pollutant dispersion and cloud formation;
- **Aerosol transport**, essential for understanding transboundary air pollution and radiative forcing;
- **Urban air quality**, especially in complex, fast-changing environments.

Furthermore, ESDTs are increasingly used in support of climate risk assessments, disaster preparedness, and policy analysis, such as evaluating the impacts of wildfire smoke, urban heat island effects, and emission control scenarios. Their modular and federated architectures also allow the interconnection of multiple digital twins (e.g., atmosphere, land, ocean, human systems), enabling more comprehensive Earth system simulations [1].

As such, ESDTs represent a paradigm shift in atmospheric science, bridging observation and simulation while enabling real-time decision support and scenario planning.

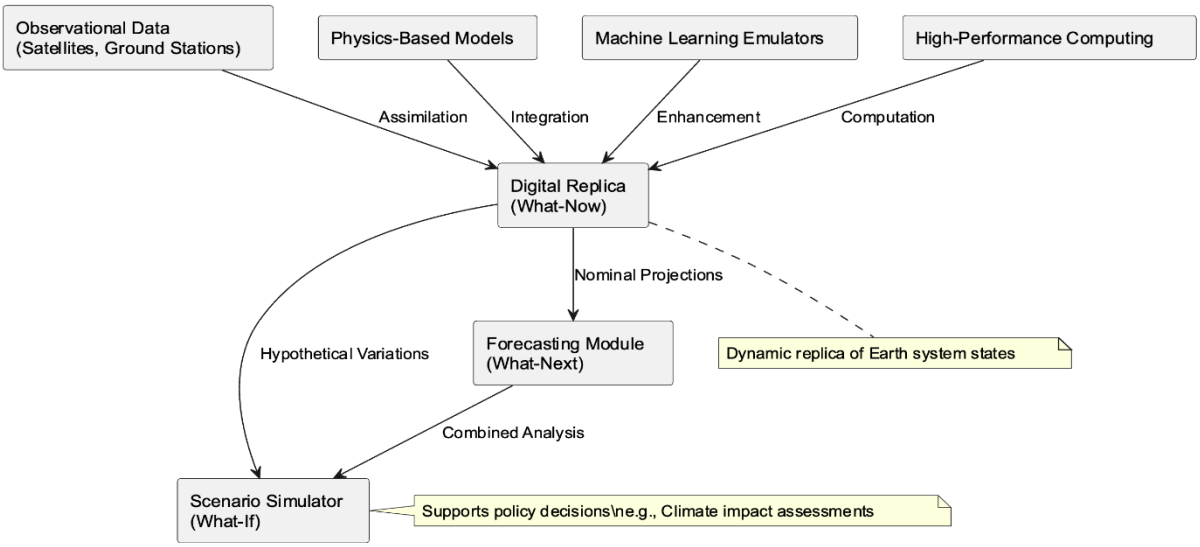


Fig. 1. Component diagram for Earth System Digital Twins, illustrating data assimilation, forecasting, and scenario exploration for atmospheric applications

2. System Dynamics Modeling

System dynamics (SD) modeling is a computational methodology for analyzing and simulating the behavior of complex systems over time through the representation of feedback loops, stocks, flows, and time delays. Originating in control theory and systems thinking, it is particularly well-suited for capturing the nonlinear and interdependent nature of atmospheric and environmental processes [11].

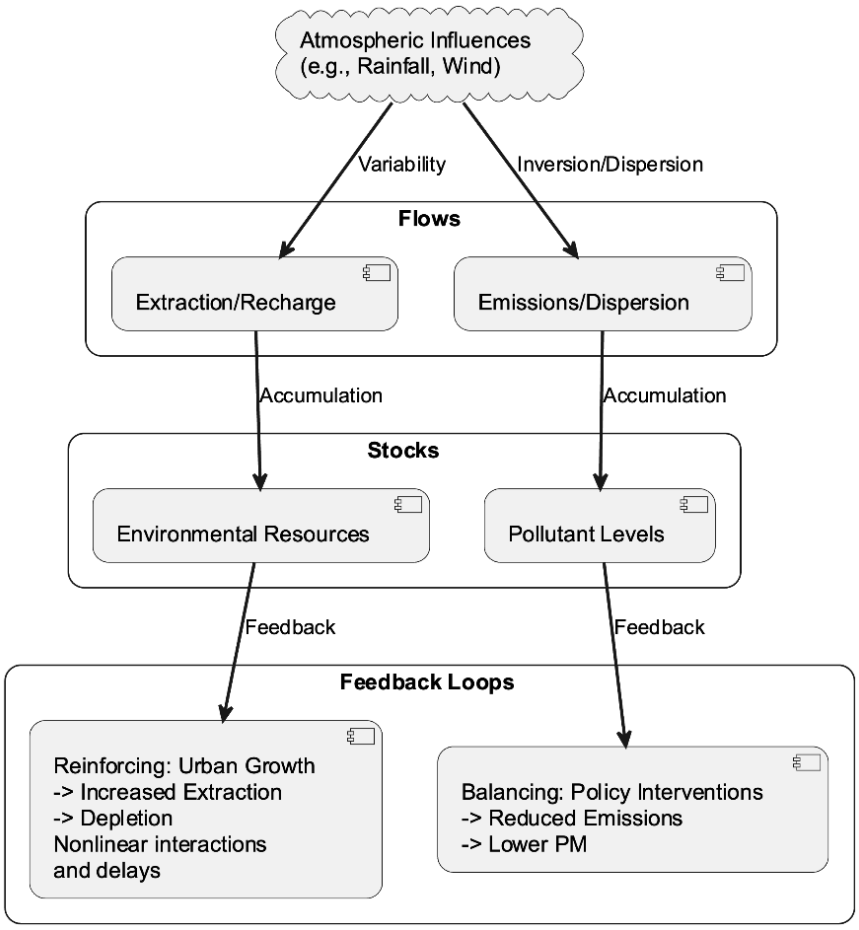


Fig. 2. Causal loop diagram illustrating system dynamics for atmospheric processes, showing stocks, flows, and feedback loops influenced by atmospheric factors

In the context of atmospheric modeling, SD offers a powerful framework for:

- **Characterizing pollutant dispersion**, including accumulation and decay under varying meteorological conditions;
- **Simulating hydrological and biogeochemical cycles**, influenced by atmospheric variables such as temperature, precipitation, and solar radiation;
- **Assessing long-term impacts of interventions**, such as emission control policies or afforestation programs.

A key strength of SD modeling lies in its ability to represent causal feedback loops, which govern the evolution of atmospheric systems. For instance, increased urbanization may amplify local temperatures through the urban heat island effect, which in turn affects energy consumption patterns and air quality dynamics that can be explicitly modeled through system dynamics diagrams [11].

SD models also facilitate scenario analysis by allowing users to vary structural assumptions, such as the intensity of feedback mechanisms or the implementation of policy levers, thus enabling comparative exploration of policy or environmental interventions [11].

By capturing both the structural complexity and temporal evolution of atmospheric systems, system dynamics modeling complements data-driven approaches and is particularly valuable for long-term planning, integrated assessments, and the communication of systemic risks to decision-makers [11].

3. Monte Carlo Simulation

Monte Carlo simulation is a statistical method that uses random sampling and repeated numerical experimentation to model complex systems characterized by uncertainty. In atmospheric science, it plays a crucial role in quantifying variability, propagating uncertainty, and assessing probabilistic outcomes in forecasting and environmental risk analysis [6].

In practical terms, Monte Carlo simulations involve generating large ensembles of scenarios by sampling input variables such as wind speed, temperature, emission rates, or humidity from specified probability distributions. These simulations are then used to estimate statistical properties of model outputs, including means, variances, confidence intervals, and exceedance probabilities.

Key applications in atmospheric modeling include:

- **Uncertainty quantification** in air quality forecasts, where Monte Carlo approaches assess the likelihood of exceeding pollution thresholds (e.g., $PM_{2.5}$ or ozone concentrations);
- **Probabilistic climate projections**, where future atmospheric states are simulated under varied emission trajectories and model parameterizations;
- **Risk assessment of extreme events**, such as heatwaves, storm surges, or wildfire smoke dispersion, where probabilistic modeling helps estimate impact likelihoods and inform emergency preparedness;
- **Error propagation analysis** in satellite retrievals, improving the reliability of remote sensing products by accounting for uncertainties in instrument calibration, cloud masking, or radiative transfer models.

A notable strength of the Monte Carlo approach is its flexibility and model-agnostic nature, allowing it to be integrated with both physics-based and machine learning models. For example, a neural network trained on atmospheric variables can be subjected to Monte Carlo sampling of its inputs to generate uncertainty-aware forecasts.

While computationally intensive, especially when high-resolution simulations are required, the method remains a cornerstone of probabilistic modeling in atmospheric sciences, providing essential support for robust decision-making under uncertainty [6].

Neural Networks and Extreme Learning Machines

1. Neural Networks for Atmospheric Modeling

Neural Networks (NNs) are foundational tools in intelligent atmospheric modeling due to their ability to learn complex, nonlinear relationships from large datasets. Their architectures particularly Convolutional Neural Networks (CNNs) and Long Short-Term Memory networks (LSTMs) are widely applied across spatial and temporal domains [3].

- **CNNs** are highly effective for analyzing satellite imagery (e.g., from MODIS or Sentinel-5P), enabling tasks like cloud classification, aerosol plume detection, and storm system identification. Their layered structure captures spatial patterns critical for high-resolution atmospheric analysis.
- **LSTMs**, a subclass of Recurrent Neural Networks, are adept at modeling sequential data, such as pollution trends, temperature variation, or wind speed dynamics, enhancing short-term forecasting of meteorological conditions.

- **Physics-Informed Neural Networks (PINNs)** integrate domain-specific equations (e.g., radiative transfer or advection-diffusion equations), improving generalization in data-sparse conditions while maintaining physical realism.

While NNs deliver high predictive accuracy, their training is computationally intensive, especially for deep architectures, which can limit their use in real-time applications.

2. Extreme Learning Machines: Speed and Efficiency

Extreme Learning Machines (ELMs) are single-hidden-layer feedforward networks known for fast, non-iterative training, making them well-suited for time-sensitive atmospheric tasks [7, 8].

Unlike traditional NNs, ELMs randomly initialize input weights and analytically compute output weights, often achieving 100–1000× faster training times [8]. This efficiency enables applications such as:

- **Near real-time air quality forecasting**, using streaming satellite data (e.g., $PM_{2.5}$ estimation from TROPOMI);
- **Anomaly detection** in atmospheric variables (e.g., thermospheric density or visibility degradation) [4];
- **Onboard satellite data processing**, where computational resources are constrained.

Recent ELM variants incorporate kernel methods and sparsity constraints, improving robustness against noise and scalability to large Earth observation datasets. While ELMs may underperform in highly complex feature extraction compared to deep NNs, their simplicity and speed offer significant advantages in operational settings.

3. Comparison of Neural Networks and Extreme Learning Machines

A comparative analysis of neural networks (NNs) and extreme learning machines (ELMs) reveals trade-offs in predictive accuracy and real-time efficiency, particularly relevant for atmospheric forecasting tasks involving satellite data [3, 7, 8]. NNs generally excel in handling highly complex, nonlinear patterns, achieving superior accuracy in benchmarks such as storm trajectory prediction (e.g., RMSE < 0.05). However, their iterative backpropagation training can take hours to days, hindering real-time deployment. In contrast, ELMs offer comparable or occasionally superior accuracy in time-series applications like wave energy forecasting (closely analogous to atmospheric wave propagation), with training speeds 10–100 times faster, enabling efficient processing of streaming Earth observation data. ELMs also demonstrate strengths in simplicity and robustness for large datasets, though NNs may outperform in scenarios requiring deep architectures for intricate feature extraction, such as multispectral image analysis [3].

The following Table 1 summarizes key metrics from recent studies:

Table 1. Comparison of Neural Networks and Extreme Learning Machines

Aspect	**Neural Networks (NNs)**	**Extreme Learning Machines (ELMs)**
Predictive Accuracy	High (e.g., outperforms ELMs in deep feature tasks; RMSE ~0.05 for nonlinear dynamics [3])	Comparable or better in fast time-series (e.g., superior in wave forecasting benchmarks [7])
Training Time	Slow (iterative; hours–days for large datasets) [3]	Fast (analytical; seconds–minutes, 1000x speedup over backprop [8])
Real-Time Efficiency	Limited by computation; suitable for offline [3]	High; ideal for streaming/onboard processing [7, 8]
Suitability for Atmospheric Applications	Complex simulations (e.g., radiative transfer) [3]	Operational nowcasting (e.g., aerosol visibility) [7]

This comparison highlights the complementary strengths of NNs and ELMs. NNs are ideal for deep, accuracy-critical modeling, while ELMs offer practical advantages for real-time and resource-constrained applications [3, 7, 8].

Genetic Algorithms

Genetic Algorithms (GAs) are adaptive, population-based optimization techniques inspired by natural selection. They operate by evolving a population of candidate solutions through selection, crossover, and mutation, with the goal of maximizing or minimizing a fitness function [9]. In the context of atmospheric modeling, GAs serve as powerful tools for hyper-parameter optimization, structural tuning, and decision support under uncertainty.

1. Optimization of Atmospheric Models

GAs are particularly valuable for optimizing the parameters of data-driven and hybrid models such as:

- **Neural Networks and Extreme Learning Machines**, where they can adjust learning rates, hidden layer sizes, and activation functions to improve forecast accuracy;
- **System Dynamics simulations**, where they calibrate feedback coefficients and delay parameters to better represent real-world atmospheric interactions.

These optimization tasks often involve high-dimensional, non-convex search spaces, where traditional gradient-based methods may fail or become inefficient. GAs efficiently explore such spaces using stochastic search and maintain population diversity, thereby avoiding local optima.

2. Practical Applications in Atmospheric Science

Genetic Algorithms have been applied in a variety of atmospheric and Earth observation contexts, including:

- **Satellite scheduling** for atmospheric monitoring: optimizing the timing and path of satellite sensors to improve coverage during dynamic events such as hurricanes or dust storms;
- **Air quality modeling**: calibrating dispersion models to match observed $PM_{2.5}$ levels in urban areas, using both ground station and satellite-derived data;
- **Model coupling**: facilitating integration between data-driven models and physical process models (e.g., coupling NN-based plume predictions with chemical transport models).

By enabling robust parameter tuning and model calibration, GAs enhance both the accuracy and reliability of atmospheric simulations, particularly under variable and uncertain conditions

3. Genetic Programming and Symbolic Regression

Genetic Programming (GP) is an evolutionary algorithm that extends Genetic Algorithms by evolving computer programs or mathematical expressions, typically represented as tree structures [10]. A specialized form of GP Symbolic Regression aims to discover explicit, interpretable equations that best describe the relationships within a given dataset, without predefining the functional form.

4. Interpretability and Model Discovery

Unlike conventional black-box models such as neural networks, GP and symbolic regression produce transparent, human-readable expressions. This makes them particularly valuable in atmospheric science, where physical interpretability is essential for understanding causal mechanisms and integrating findings into existing scientific knowledge or regulatory models.

Key advantages include:

- **Discovery of governing equations**: GP can infer new formulations of physical processes, such as pollutant dispersion, turbulent mixing, or atmospheric decay rates.
- **Parameterization of subgrid processes**: In climate models or weather simulations, GP-derived equations can serve as data-driven alternatives to empirical parameterizations.
- **Model refinement**: Symbolic regression can improve or replace empirical relationships used in satellite retrieval algorithms or air quality models.

5. Applications in Atmospheric Science

Recent applications of GP in the atmospheric domain include:

- Deriving equations for urban pollutant decay based on real-time satellite and ground sensor data;
- Modeling aerosol dynamics and cloud formation processes using symbolic expressions trained on remote sensing outputs;
- Creating hybrid physical-ML models where GP provides analytical corrections to numerical simulations based on observed discrepancies.

In these contexts, GP fosters hypothesis generation, model simplification, and uncertainty reduction, especially when observational data is sparse or noisy [10].

Large Language Models

Large Language Models (LLMs) and their multimodal extensions—such as Vision-Language Models (VLMs) represent a transformative class of AI systems capable of processing and generating natural language, imagery, and other data modalities [2, 4, 5]. In the context of Earth observation and atmospheric science, these foundation models enable natural language querying, semantic interpretation, and generative modeling across heterogeneous geospatial datasets.

1. Capabilities and Roles in Atmospheric Modeling

Recent advances have positioned LLMs as integral components in intelligent atmospheric modeling pipelines. Key functionalities include:

- **Natural language interaction**: LLMs enable intuitive access to complex atmospheric datasets (e.g., "Identify regions with high $PM_{2.5}$ concentrations using Sentinel-5P imagery"), allowing non-experts to extract insights from EO archives.
- **Multimodal data fusion**: Vision-Language Models can jointly process satellite imagery, sensor readings, and textual metadata to support cross-modal reasoning.
- **Generative scenario modeling**: LLMs can simulate plausible atmospheric outcomes (e.g., aerosol dispersion under hypothetical conditions) based on learned relationships across data modalities.
- **Zero-shot and few-shot learning**: These models can generalize to new atmospheric tasks with minimal or no retraining, enabling fast adaptation to emerging events or datasets.

2. Recent Developments and Applications

Several domain-specific LLMs and VLMs have been developed to support atmospheric and environmental applications:

- **IBM TerraMind** is a generative multimodal model trained on satellite, elevation, and geospatial data. Its *"Thinking-in-Modalities"* framework enables pollutant transport simulations and urban air quality assessments based on textual prompts. Dual-scale representations allow it to operate effectively in both zero-shot and few-shot regimes [4].
- **NASA Galileo**, developed in collaboration with the Allen Institute for AI, focuses on real-time EO data analysis. It supports tasks such as anomaly detection, storm tracking, and $PM_{2.5}$ hotspot identification using Sentinel-5P and other sources. As an open-source platform, Galileo is designed for further fine-tuning on atmospheric datasets [5].

3. Scientific and Operational Value

LLMs and VLMs offer substantial benefits for:

- **Enhancing situational awareness** during environmental crises (e.g., wildfires, extreme pollution episodes);
- **Supporting decision-makers** with natural-language summaries and predictive scenario outputs;
- **Augmenting traditional models** by generating hypotheses or refining model outputs with contextual information.

By bridging the gap between technical complexity and human understanding, LLMs significantly expand the accessibility and interpretability of atmospheric science tools.

4. Interrelationships and Combinations of Methods

The intelligent atmospheric modeling approaches discussed throughout this review exhibit strong synergies that, when combined, enhance predictive accuracy, computational efficiency, and practical applicability. The integration of these methods enables hybrid frameworks capable of addressing the multifaceted challenges inherent in atmospheric science.

Key interrelationships include:

- **Genetic Algorithms (GAs)** effectively optimize parameters and architectures within Neural Networks, Extreme Learning Machines, and System Dynamics models, leading to improved forecasting performance and model robustness [9].
- **Monte Carlo Simulations** complement deterministic models such as Digital Twins and System Dynamics by providing rigorous uncertainty quantification, essential for risk assessment and scenario evaluation under environmental variability [6].
- **Large Language Models (LLMs)** serve as integrative platforms, fusing outputs from Digital Twins and machine learning models to facilitate natural language querying, cross-modal data interpretation, and user-friendly interaction [2, 4, 5].
- **Genetic Programming (GP)** generates interpretable symbolic expressions that enhance physics-informed modeling and improve the parameterization of Digital Twins, bridging the gap between data-driven insights and mechanistic understanding [10].
- **Extreme Learning Machines (ELMs)** offer rapid retraining and efficient real-time forecasting, making them well-suited for dynamic integration within Digital Twin frameworks where timely updates are critical [7, 8].

These hybridizations not only capitalize on the individual strengths of each method but also address their limitations, fostering more resilient and adaptable atmospheric models. For instance, optimizing deep neural network structures with genetic algorithms can reduce overfitting and

computational costs, while LLMs enable intuitive access to complex model outputs, broadening the scope of stakeholder engagement [2, 4, 5].

Overall, the collaborative deployment of these intelligent modeling techniques forms a versatile and powerful toolkit for advancing atmospheric science, enabling more accurate predictions and responsive environmental management strategies.

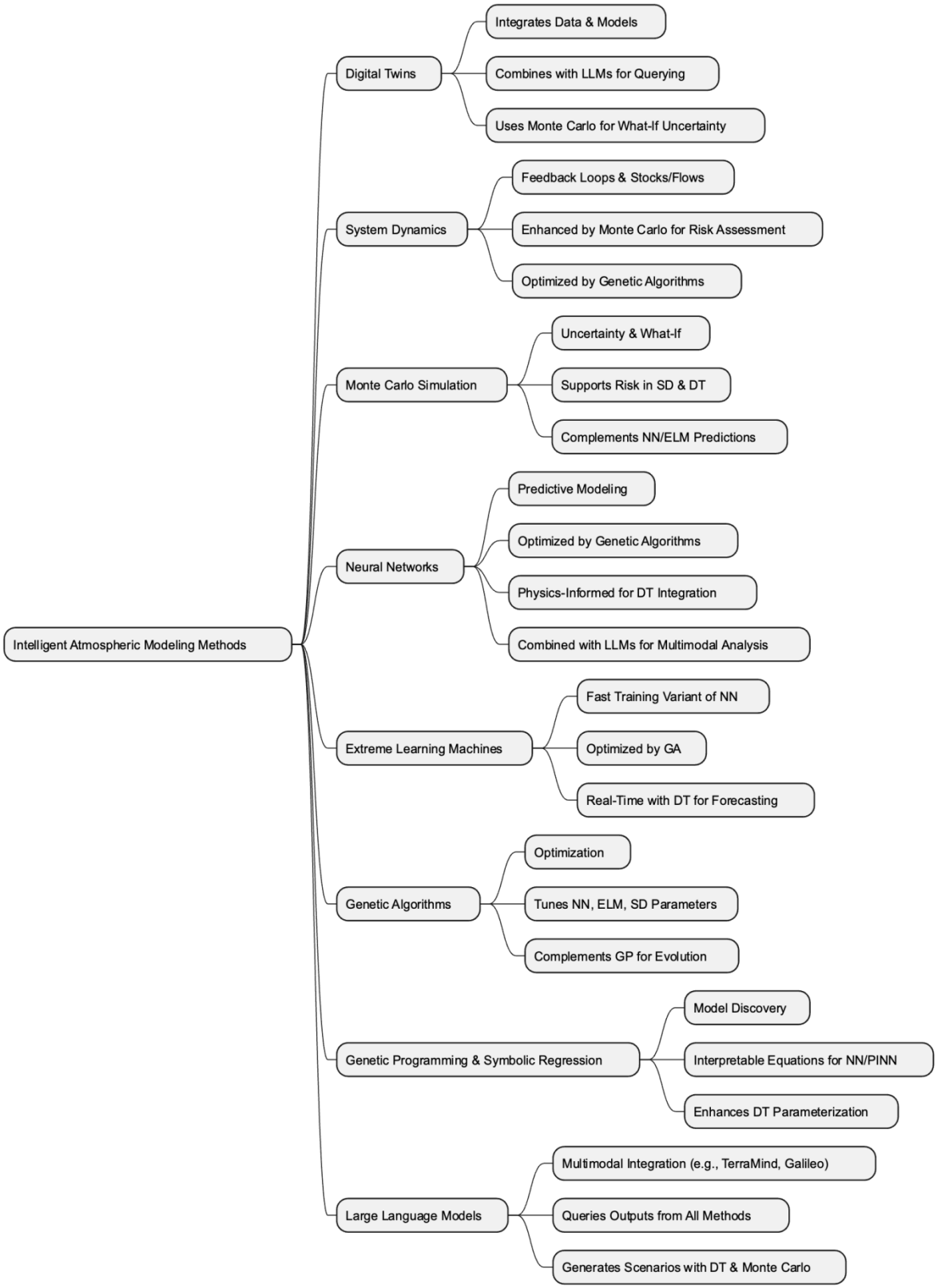


Fig. 3. Hierarchical classification diagram illustrating synergies among intelligent atmospheric modeling methods, emphasizing hybrid approaches

Conclusion

The methods reviewed herein comprising Earth System Digital Twins, system dynamics modeling, Monte Carlo simulations, neural networks, extreme learning machines, genetic algorithms, genetic programming, and large language models—constitute a comprehensive and synergistic framework for intelligent atmospheric modeling. By integrating heterogeneous Earth observation data from satellite and in situ sources, these approaches enable detailed characterization and forecasting of complex atmospheric phenomena across multiple spatial and temporal scales [1, 2, 11].

These methodologies demonstrate distinct strengths in capturing nonlinear dynamics, quantifying uncertainties, and delivering interpretable or near real-time predictive capabilities essential for operational atmospheric monitoring and risk assessment. Earth System Digital Twins facilitate high-fidelity replication of atmospheric states and scenario analysis [1]; neural networks and extreme learning machines provide robust data-driven forecasting and anomaly detection [3, 7, 8, 12]; genetic algorithms and programming optimize model parameters and derive interpretable relationships [9, 10]; and large language models enhance data fusion and user interaction through natural language processing and generative modeling [2, 4, 5].

Despite their considerable potential, challenges remain regarding computational demands, model integration complexity, and the necessity for rigorous validation and calibration to ensure reliability [3, 7, 8]. Balancing predictive accuracy with computational efficiency is critical, particularly for real-time applications.

The integration and hybridization of these methods further amplify their effectiveness. For instance, genetic algorithms can be employed to optimize neural network architectures [9], while large language models can interface with digital twins to facilitate advanced decision support [1, 2, 4, 5]. Such combinations enhance predictive performance and enable timely responses to environmental hazards, including air pollution events, wildfire smoke dispersion, and extreme weather occurrences.

Beyond advancing scientific understanding, these intelligent atmospheric modeling frameworks provide invaluable tools for policy formulation, environmental management, and public health protection [1, 6, 11]. They underpin the assessment of climate change impacts, support disaster risk reduction strategies, and inform regulatory and urban planning decisions.

In summary, the continued advancement, integration, and operational deployment of these sophisticated modeling approaches are imperative for improving our capacity to accurately model and manage atmospheric processes. These efforts will equip researchers, policymakers, and stakeholders with enhanced capabilities to address pressing environmental challenges and foster a more resilient and sustainable future [1, 6, 11].

References:

1. NASA Earth Science Technology Office. (2023). Earth System Digital Twins Workshop Report. https://esto.nasa.gov/files/ESDT_Workshop_Report.pdf
2. Xiao, A., et al. (2024). Foundation Models for Remote Sensing and Earth Observation: A Survey. arXiv:2410.16602
3. Zucker, S., et al. (2024). Physics-informed neural networks for atmospheric radiative transfer. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer
4. Jakubik, J., et al. (2025). TerraMind: Large-Scale Generative Multimodality for Earth Observation. arXiv:2504.11171
5. Allen Institute for AI. (2025). Introducing Galileo: An Open-Source Model for Earth Observation. NASA Harvest Collaboration
6. Trees, V. J. H., et al. (2025). MONKI: A three-dimensional Monte Carlo simulator. Copernicus Publications
7. Ali, M., et al. (2021). Advanced extreme learning machines vs. deep learning models for peak wave energy period forecasting: A case study in Queensland, Australia. Renewable Energy, 178, 350–362
8. Huang, G.-B., et al. (2006). Extreme learning machine: A new learning scheme of feedforward neural networks. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2004
9. Pan, Y., Bélanger S. (2024). Genetic Algorithm for Atmospheric Correction. Remote Sensing of Environment
10. McGovern, J., et al. (2025). Potential for equation discovery with AI in the climate sciences. Earth System Dynamics
11. Izadbakhsh, H., et al. (2024). A Comprehensive System Dynamics Model for Air Pollution Management in Metropolitan Cities. Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society, 1–17. https://proceedings.systemdynamics.org/2024/papers/P1444.pdf
12. Zhang, L., et al. (2025). Interpretable Machine Learning for Thermospheric Mass Density. Space Weather.

ГЕОПРОСТРАНСТВЕНО ОСИГУРЯВАНЕ С ОТВОРЕН КОД И НЕГОВИТЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Любосвет Стоев, Живо Петров

Военна академия „Георги Стойков Раковски“
e-mail: l.stoev@rndc.bg

Ключови думи: *географски информационни системи, софтуер с отворен код, публични геопространствени данни, сливане на данни, разузнаване по открити източници*

Резюме: *Геопространственото осигуряване включва използването на геопространствени данни, технологии и системи с цел събиране, анализ, визуализация и управление на информация, свързана с местоположения върху земната повърхност. Такава методология е широко използвана в много области, в това число военни операции, градско планиране, управление на природните ресурси, управление на отговора при извънредни ситуации и телекомуникациите. В доклада са разгледани достъпните инструменти с отворен код, различни сценарии за тяхната употреба и е оценена тяхната добавена стойност. Специално внимание е отделено на процеса на разузнаване по открити източници, необходимите за него инструменти и приложения.*

OPEN-SOURCE GEOSPATIAL SUPPORT AND ITS APPLICATIONS

Lyubosvet Stoev, Zhivo Petrov

Georgi S . Rakovski National Defense College
e-mail: l.stoev@rndc.bg

Keywords: *geographic information systems, open source software, public geospatial data, data fusion, open source intelligence*

Abstract: *Geospatial support involves the use of geospatial data, technologies, and systems to collect, analyze, visualize, and manage information related to locations on the Earth's surface. It is widely used across many fields, including military operations, urban planning, natural resource management, emergency response, and telecommunications. The work reviews the available open source tools, its user cases and their end value. A special emphasis is given to the process of open source intelligence (OSINT), its tools and its applications.*

Въведение

Геопространственото осигуряване включва приложението на геопространствени данни, технологии и системи за събиране, анализ, визуализиране и управление на информация, свързана с местоположения на земната повърхност. Този процес участва използва широко в много области, включително военни операции, градско планиране, управление на природните ресурси, реагиране при извънредни ситуации и телекомуникации.

Геопространственото осигуряване изисква създаването, архивирането, поддържането и употребата на геопространствени масиви от данни – колекции от географски данни, свързани с местоположения в реалния свят. Тези набори от данни могат да включват сателитни изображения, географски информационни системи (ГИС), услуги, базирани на местоположение (LBS), и технологии за дистанционно наблюдение. Целта е да се разберат пространствените взаимоотношения между наблюдаваните обекти и да се подпомогне вземането на решения, основани на анализ на данни. Тези решения могат да бъдат свързани с преодоляване на терена, изграждане и управление на инфраструктура, на природните ресурсите и околната среда [1].

При военни действия геопространственото осигуряване заема важно място [2] наред с останалите видове осигуряване – материално техническо, логистично, комуникационно и др. Геопространственото осигуряване е в основата на изграждането на ситуационна осведоменост, която е неделима част от управлението на бойното поле, логистиката и оперативното, както и самото стратегическото планиране. Геопространственото осигуряване дава възможност да се интегрират данни от разузнаването и предните наблюдатели, като по този начин се осъществява навигацията и насочването на бойните средства. Командирите на различни нива използват геопространствената информация, получена от сливане с помощта на ГИС на сателитни данни и такива, предоставени от безпилотни летателни системи (БЛС), за да визуализират опозната картина на бойното пространство, да прогнозират движението на противника, да оптимизират маршрутите за доставки и да координират своите действия с точност и прецизност.

Последните тенденции в ГИС технологиите включват приложението на изкуствения интелект (ИИ) за Геопространствен анализ, който да осигури разпознаване на конфигурации и структури и прогнозно моделиране в реално време. Посредством внедряването на интелигентни устройства в развърнатите на полето средства – чрез т. нар. „интернет на нещата“ (IoT) – могат да се регистрира и обработва телеметрия в реално време, която вкючва данни за местоположението, за пространствената ориентация и за физичните и химични параметри на средата. Използването на отдалечени „облачни“ ГИС решения, позволява мащабируеми и достъпни геопространствени услуги, подсигурени срещу откази, чрез разпределена и резервирана поддръжка. Не на последно място, разширените съвременни средства за визуализация – такива като 3D моделиране и интерактивни карти позволяват по-добра интерпретация на данните от човешки потребители.

Освен чисто военните приложения, геопространственото осигуряване повишава ефективността на земеделските производители, като им предоставя услуги за картографиране на почвените и метеорологичните модели, подпомага градското планиране и реагирането и реагирането при извънредни ситуации, управлява природните ресурси [3] чрез наблюдение на горите и водните пътища и поддържа телекомуникационните мрежи чрез оптимизиране на разположението на мобилната инфраструктура.

Обобщена структура на система за геопространствено осигуряване

Една типична системата за геопространствено осигуряване включва се състои от пет основни компонента, които работят съгласувано, за да осъществят събирането, съхранението, анализа, визуализацията и използването на геопространствени данни:

Хардуер: Това са физически устройства, сред които компютри, (в това число приемници от глобална навигационна система (GPS, ГЛОНАС, Байду или Galileo), БЛС, средства за дистанционно наблюдение и сондиране на земното/водното пространство, устройства за съхранение и мрежова инфраструктура. Те осигуряват придобиването, съхранението, свързаността и изчислителната мощ, необходими за обработка, анализ и управление на големи пространствени набори от данни [4].

Софтуер: ГИС платформи (като ArcGIS, QGIS, MapInfo и др) и системи за управление на пространствени бази данни, които предлагат инструменти за управление, анализ, визуализиране и споделяне на геопространствени данни. Това може да включва специализирани аналитични инструменти (GDAL) и мрежови картографски услуги плъгини.

Данни: Това е основният ресурс на системата, който се състои от пространствени данни. Те могат да са *векторни данни* като точки, линии, полигони, *растерни данни* като сателитни изображения или модели на релефа) и свързани атрибутни данни – наименования, георефериранни характеристики на средата и др. Източниците на тези данни включват сателитни измервания и изображения, теренни проучвания, дистанционно наблюдение и сондиране. Източник могат да бъдат правителствени или съюзнически записи, търговски или публични доставчици.

Работният поток включва дефинирани процеси и йерархично разпределение на задачите и дейностите за осигуряване на точно, последователно и ефикасно събиране, обработка и анализ на геопространствени данни. По този начин се гарантира надеждност и повторяемост на резултатите със значима добавена стойност.

Не на последно място стои **квалифицираният персонал**, който включва, картографи, разработчици, ГИС анализатори, учени и лица, вземащи решения, които управляват системата,

интерпретират данни, разработват приложения и използват резултатите, за да вземат информирани решения.

Тази комбинация позволява на системите за геопространствено осигуряване ефективно да поддържат широк спектър от приложения, включително военни операции, градско планиране, мониторинг на околната среда и управление на инфраструктурата.

Геопространствено осигуряване с отворен код

Въпреки, че системите за геопространствено осигуряване традиционно се изграждат с помощта на частни софтуерни решения, все по-голямо значение започват да придобиват ресурси, които се разпространяват с отворен код [5], насочени към публични академични институции, неправителствени организации и неформални групи. Съществуват редица добре познати семейства ГИС приложения с отворен код и софтуерни платформи, които предоставят мощни възможности за управление, анализ, визуализация и споделяне на геопространствени данни. По-долу са изброени някои от водещите примери за такива ресурси:

GeoServer е сървър с отворен код за споделяне и публикуване на геопространствени данни от различни източници, които използват отворени стандарти. Той ефективно и на ниска цена осигурява оперативна съвместимост и уеб-базирани геопространствени услуги.

QuanumGIS или (QGIS) е широко използвана безплатна настолен ГИС платфрма си отворен код и богата функционалност за редактиране, анализ, картография и поддръжка на плъгини за геопространствени данни.

GRASS GIS:е платформа с много възможности за геопространствена обработка, както в сървърен, така и в настолен вариант. Системата е разработена първоначално от Инженерния корпус на армията на САЩ. Тя се разполага с инструменти за пространствено моделиране, обработка на изображения и анализ на временни редове.

OpenLayers е JavaScript библиотека с отворен код за вграждане на динамични карти в уеб-страници, която поддържаща различни геопространствени формати и мрежови картографски услуги като OpenStreetMap и Mapbox.

GeoNode е уеб-базирана платформа за създаване на геопространствени информационни системи и инфраструктури за пространствени данни, която позволява съвместно споделяне и визуализация на геопространствени данни.

OSGeo е продукт на Фондацията за геопространствени инструменти с отворен конф(Open Source Geospatial Foundation). Това е много ценен инструмент, който позволява бърза интеграция в решения със скриптови програмни езици като Python

Всички тези платформи и инструменти, наред с много други, предлагат надеждни решения за задачи по непосредствено геопространствено осигуряванев научни изследвания, мониторинг на околната среда, градско планиране и военни приложения с предимствата ръководено от общността развитие.

Геопространствени инструменти за разузнаването по открити източници

Геопространствените инструменти с отворен код са изключително важни за разузнаването по открити източници (OSINT) [6], защото предоставя основни инструменти и източници на опорни данни [7] за събиране, анализ и визуализиране на информация, свързана с местоположение, от публично достъпни платформи. Тази връзка обогатява OSINT разследванията, като добавя пространствен контекст и географски връзки, които са критични за разбирането на движенията, дейностите и средата, свързани с обектите от интерес.

OSINT използва геопространствени инструменти с отворен код, за да анализира географски данни, извлечени от социални медии, сателитни изображения, карти и други цифрови източници, като по този начин проследява местоположенията, движенията и пространствените взаимоотношения на индивиди, групи или събития. Отворените платформи за геопространствени данни като OpenStreetMap, GeoNames и хранилища за сателитни изображения предоставят основни географски данни, които специалистите по OSINT използват, за да изградят пространствен контекст на придобитата информация. Софтуерните библиотеки

с отворен код за ГИС, включително QGIS, GDAL, GeoPandas и Leaflet, се използват често в OSINT за обработка на пространствени данни, създаване на карти и провеждане на пространствен анализ и изграждане на модели или идентифициране на географски точки от интерес.

Ключови методи на OSINT процеса са извличането на метаданни от цифрови файлове за получаване на GPS координати, анализ на геоетикети в социалните медии, геолокация на IP адреси и анализ на сателитни изображения и изображения от БЛС, които се възползват от отворените технологии за геопространствена поддръжка [2].

Геопространственото разузнаване с отворен код подкрепя правоприлагането, киберсигурността, реагирането при бедствия и анализа на сигурността, като предоставя георефериранa информация, която допълва традиционните данни. По същество, ГИС-инструментите с отворен код осигуряват аналитиците, особено такива от неправителствени организации и граждански инициативи с рентабилни и достъпни средства за включване на подробен географски контекст в техните работни процеси, като по този начин подобряват богатството и прецизността на техните анализи.

Заключение

В заключение можем да отбележим че разгледаният в доклада инструментариум предлага възможности за изграждане на достъпна, но ефективна система за геопространствено осигуряване, която, благодарение на отсъствието на лицензионни ограничения, може да се използва при динамично организиране на взаимодействие на властите с неформални организации от доброволци и неправителствени организации, което прави този подход незаменим при действия в отговор при кризи и извънредни ситуации.

Литература:

1. Duque, J. P. and Brovelli, M. A.: SYSTEM ARCHITECTURE FOR GEOSPATIAL VIRTUAL DATA INTEGRATION IN WEB-BASED APPLICATIONS, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-1/W2-2023, 939–944, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-939-2023, 2023
2. https://www.t-kartor.com/blogs/how-militaries-use-geospatial-technology [visited 2025-10-08 15:41 EEST]
3. https://geospatialworld.net/blogs/geospatial-technology-a-constructive-support-system-to-solve-environmental-issues/ [visited 2025-10-08 15:49 EEST]
4. https://www.pape-dawson.com/news/unveiling-the-essential-components-of-geographic-information-systems/ [visited 2025-10-08 15:48 EEST]
5. https://gisgeography.com/free-gis-software/ [visited 2025-10-08 15:48 EEST]
6. https://medium.com/@enhanced-due-diligence/what-is-osint-2cda399fac53 [visited 2025-10-08 15:56 EEST]
7. https://www.sanctions.io/blog/open-source-intelligence-osint-framework [visited 2025-10-08 15:56 EEST].

ОПЕРАТИВНА ПОДДРЪЖКА НА ФОТОВОЛТАИЧНИТЕ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ И СЛЪНЧЕВАТА АКТИВНОСТ

Анатоли Радев, Ангел Манев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: amanev@abv.bg

Ключови думи: *слънчев цикъл, единица слънчев поток, фотоволтаични модули, полупроводникови материали*

Резюме: *Обсъждат се границите на изменение на интензитета на слънчевия радиационен поток при дължина на вълната 10.7 cm от 2000 г. до наши дни. Направен е анализ на* ефективността на различните типове фотоволтаични модули. *В резултат от изследването са дадени указания за изграждане и поддръжка на* фотоволтаичните електроцентрали *с цел постигане на по-добра икономическа рентабилност.*

OPERATIONAL MAINTENANCE OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS AND SOLAR ACTIVITY

Anatoli Radev, Angel Manev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: amanev@abv.bg

Keywords: *solar cycle, solar flux unit, photovoltaic modules, semiconductor materials*

Abstract: *The ranges of variation in the intensity of the solar radiation flux at a wavelength of 10.7 cm from 2000 to the present are discussed. An analysis of the efficiency of different types of photovoltaic modules has been carried out. As a result of the study, recommendations for the construction and maintenance of a photovoltaic power plants are provided, aimed at achieving better economic profitability.*

Въведение

За целите на проектиране и експлоатация на фотоволтаичните (ФВ) електроцентрали е необходимо добро познаване на климатичните условия и геофизичните характеристики на района, в който ще бъдат изградени. Климатът над територията на България се формира основно под въздействието на циклоничната и антициклоничната дейност, преминаваща над страната. Допълнително влияние оказват постоянните ветрови полета и температурният режим на повърхността на Черно море. Макар тези фактори да не са водещи при формирането на метеорологичното време, те имат съществено значение за ежедневната експлоатация на ФВ електроцентрали.

Атмосферни и слънчеви фактори

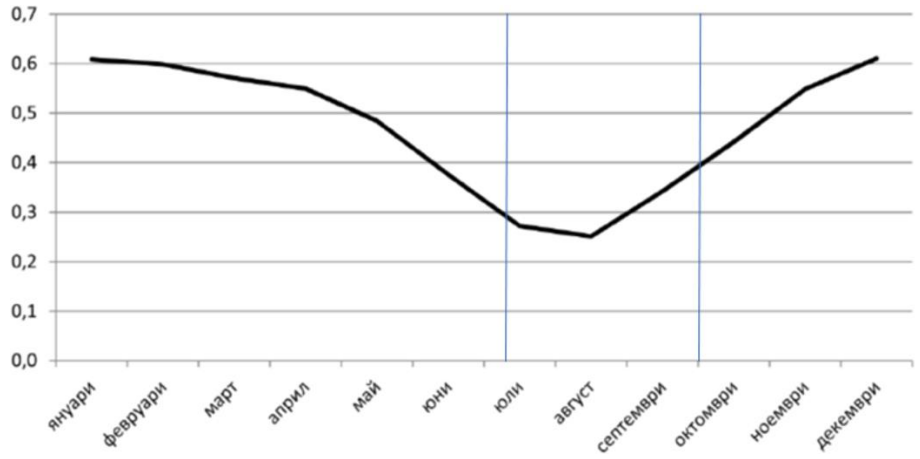
Над България преминават два вида циклони. Тези, които се формират над Азорските острови и тези, които възникват в областта на Средиземно море. Генезисът на циклоналната дейност за сега е тайна за науката. Правят се проучвания за връзката между слънчевата енергия, която се акумулира през лятото в обема на Атлантическия океан и броя на възникналите циклони през следващата година, но тези изследвания още нямат завършен и категоричен вид.

Основните антициклони, които достигат България и формират дълги периоди от време с чисто и ясно небе, са тези, които възникват над азиатската част на Русия. Техният генезис

също е определен с недостатъчна степен на категоричност. Във всеки случай, при анализа на слънчево-земните връзки, свързани с мощността на енергийните потоци от Слънцето, достигащи до повърхността на Земята, трябва да се изследват дните, в които няма циклонална дейност.

С настоящото изследване не се цели да се проследява динамиката на климатичните особености над България или вариациите на метеорологичните промени в детайли. Основният фактор, който определя ефективността на ФВ системи, е динамиката на слънчевата инсолация. За да се открои въздействието ѝ, трябва да се отчетат, само най-значимите фактори, които влияят на нейната големина. Затова се разглеждат само влажността на въздуха, температурата и облачността над България като цяла територия. По този начин ще се открояят базови параметри, които да се използват при моделирането на ФВ електроцентрали.

На Фигура 1 е показана графиката, показваща изменението на общата облачност над територията на България, измерена в дялове от небето, покрито с облаци [2]. Данните са от European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) при анализ за периода 1979–2015 г.

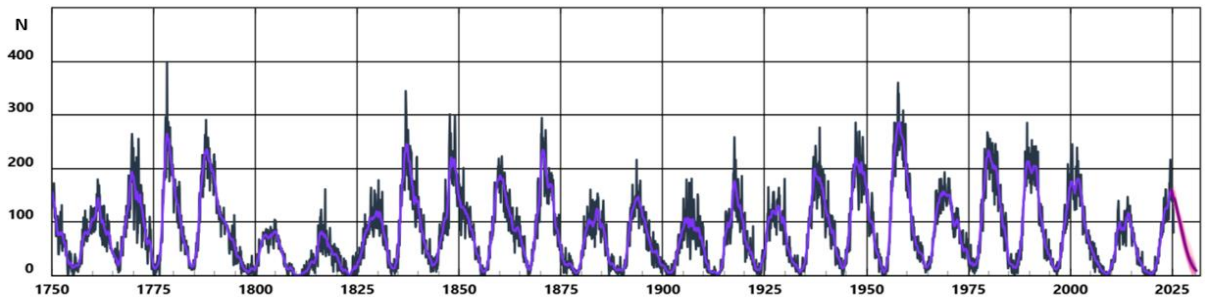


Фиг. 1. Вътрешногодишен ход на общата облачност над България по данни от ECMWF анализ за периода 1979–2015 г. [2]

Пространственото разпределение на продължителността на слънчевото греене в България съвпада до голяма степен с пространственото разпределение на облачността, като районите с по-голяма облачност имат по-малка продължителност на слънчевото греене и обратно. Корелацията между тези два елемента е статистически значима и може да се приеме, че вариациите в облачността определят до около 85-90% от вариациите на продължителността на слънчевото греене [1].

От графиката на Фигура 1 е видно, че в периода 5 юли до 1 септември, облачността е под 0.3. Или може да се предположи, че през този период на много ниско съдържание на облаците над България, ще се проявят най-добре тенденциите в изменението на слънчевата инсолация, с минималното влияние на атмосферата. Тази е причината, поради която, в настоящото изследване се използват данни за слънчевата активност само за период от 88 дни (от 5 юли до 30 септември).

На Фигура 2 е показано изменението на слънчевата активност на базата на броя на слънчевите петна. Данните са придобити от Националната администрация по океани и атмосфера на САЩ (National Oceanic and Atmospheric Administration).



Фиг. 2. Цикличност на слънчевата активност за периода 1750–2025 г. на база брой слънчеви петна [3]

Явна е цикличността на повишаване и спадане на енергийното въздействие на Слънцето. За сега са определени 24 броя, сега сме в 25-ти, слънчеви цикли. Продължителността на всеки цикъл е в границите на 9–14 години. За грубото моделиране се използва, така наречения „слънчев цикъл“ от 11 години.

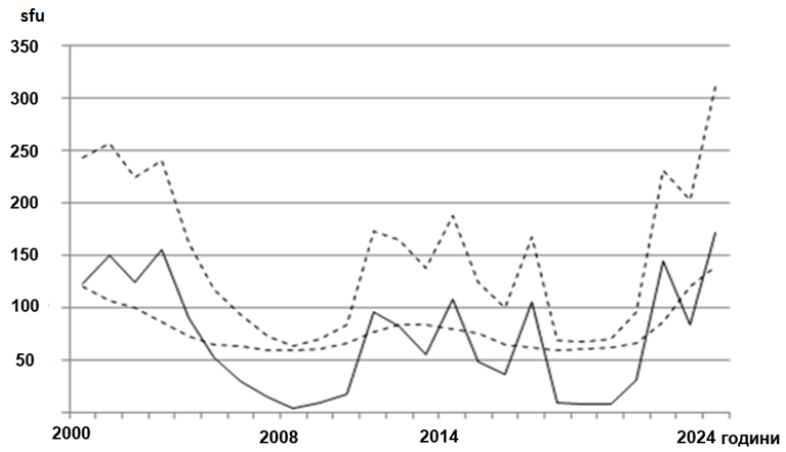
Исторически се е наложило слънчевата активност да се изследва според появата на слънчевите петна. Тези наблюдения са отчасти субективни, затова не могат да се използват за точни количествени оценки. Най-достоверни са данните за интензитета на слънчевата активност при дължина на вълната 10.7 cm (индекс F10.7). Такива данни са показани на Фигура 3, също придобити от NOAA. Тази графика е построена чрез усреднените месечни наземни измервания на слънчевата радиация, изразени в единици слънчев поток (sfu).

Фиг. 3. Изменение на слънчевата активност през при дължина на вълната 10.7 cm [3]

Базата данни на Световния център за данни по слънчево-земна физика (World Data Center for Solar-Terrestrial Physics) [6] съдържа данните за ежедневните стойности в три формата: непосредствените измервания, калибрираните стойности на измерванията и абсолютните стойности на измерванията. Данните са непрекъснати за периода от 1947 до 2025 г. Но абсолютните стойности, които са най-добри за моделиране, са с прекъсване от 1989 до 1998 г. Това наложи изследването да се ограничи само за периода 2000–2024 г. Този период включва втората половина на 23-ия слънчев цикъл, целият 24-и цикъл и първата половина на 25-ия цикъл.

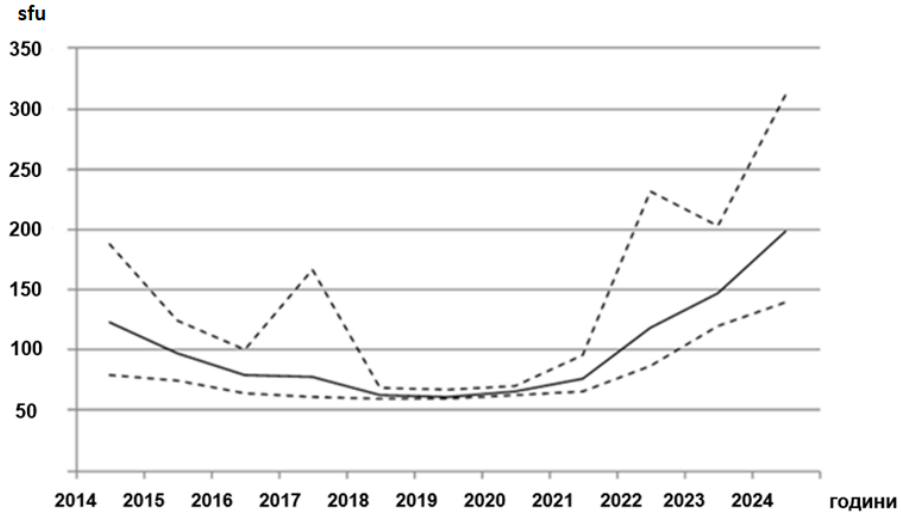
Графиката на фиг. 4 акцентира върху амплитудата на вариациите в слънчевата активност, изразена чрез разликата между минималните и максималните стойности на слънчевия радиационен поток, което отразява дългосрочните флуктуации на слънчевата активност.

На същата фигура са показани както зоната, ограничена от минималните и максималните стойности на слънчевата активност (представени с пунктирани линии), така и динамиката на разликата между дневните максимални и минимални стойности за периода 2000–2024 г. Във времето, когато Слънцето се намира в и около максимума на своята активност в рамките на 11-годишния цикъл, се наблюдава по-голяма амплитуда на вариациите. Обратно – в периодите на минимум размахът на дневните отклонения от средното за годината е значително по-малък.



Фиг. 4. Динамиката на изменението на слънчевата активност за периода 2000–2024 г.

На Фигура 5 е показана зоната на изменение на максимумите и минимумите на слънчевата активност за съответната година от 2014 до 2024 г., представена в интервала, очертан от двете пунктирани линии. Непрекъснатата линия показва средната стойност на слънчевата активност за съответната година. Големите отклонения през 2017 и 2022 г. се дължат на изключително силни слънчеви събития в рамките на тези години.



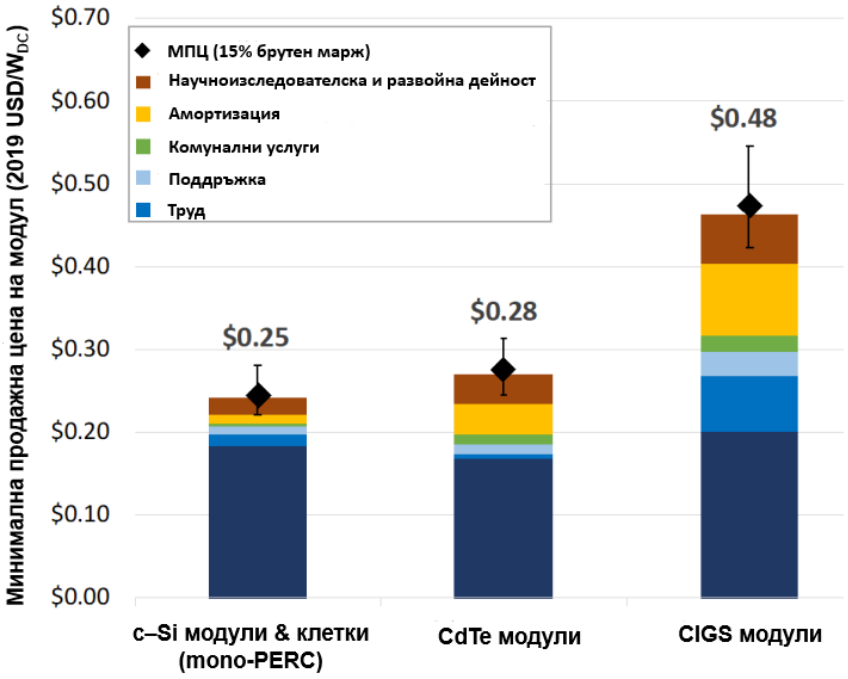
Фиг. 5. Граници на изменение на слънчевата активност за периода 2014–-2024 г.

На графиката на слънчевата активност, показана на фиг. 5 много добре се открояват фазите на максимум, спад и минимум, на 24-и слънчев цикъл. Максимумът е около 2014 г., а минимумът около 2019 г.

Доказано е, че данните за слънчевата активност, заедно с климатичните особености на България, могат и трябва, да се използват при проектирането, експлоатацията и планирането на ремонтната дейност на фотоволтаичните електроцентрали в България.

Разликите в полупроводниковите материали при различните типове ФВ клетки водят до различна степен на чувствителност към спектралните промени на слънчевото излъчване. Така например, модулите на базата на кристален силиций (c-Si) и монокристален силиций с пасивиран емитер и задна повърхност (mono-PERC) показват висока стабилност на ефективността при промени в спектралния състав на излъчването и ниска чувствителност в ултравиолетовия (UV) диапазон. От друга страна, тънкослойните модули на кадмиев телурид (CdTe) и медно-индиево-галиев диселинид (CIGS), поради ширината на забранената зона и специфичния си спектрален отклик, проявяват по-голяма зависимост от измененията в UV и инфрачервената радиация. В резултат, енергийният добив на отделните типове ФВ модули се изменя по различен начин по време на слънчев минимум и максимум**,** като чувствителността към спектралните промени определя техния реален коефициент на полезно действие в различните фази на слънчевия цикъл.

Технологиите, базирани на c-Si, доминират настоящия пазар, като техните минимални продажни цени (МПЦ) са най-ниски. Стойността за mono-PERC са сходни ($0.25–$0.27/W) за всички анализирани c-Si технологии. Модулите от CdTe имат малко по-висока стойност на МПЦ ($0.28/W), а при CIGS тя е значително по-висока ($0.48/W) [5].



Фиг. 6. Обобщение на МПЦ на модулите на утвърдените фотоволтаични технологии, 2020 г. [5]

За провеждането на настоящите изследвания, освен базата данни от световния център (World Data Center for Solar-Terrestrial) [6], са използвани стандартните пакети на Microsoft Office и безплатните версии на няколко статистически пакети програми като Statistica 7. Всички данни и програмни системи са безплатни и достъпни за нуждите на научните изследвания.

Заключение

Настоящото изследване демонстрира потенциала на интердисциплинарния подход в инженерната дейност, свързана с проектирането и експлоатацията на ФВ електроцентрали. Познаването на динамиката на слънчевата активност в рамките на един пълен слънчев цикъл позволява оптималното подбиране на типа ФВ модул според конкретната фаза на цикъла, което подобрява ефективността и икономическата рентабилност на системата. По този начин тя може да работи при оптимални производствени мощности, като това води до по-висок енергиен добив и ефективност. Същевременно планирането на ремонтните и обслужващите дейности може да се синхронизира със спада на слънчевата радиация.

Литература

1. Ножаров П. (2015), Съвременни тенденции в режима и разпределението на облачността и слънчевото греене в България, Проблеми на географията, 2015, бр. 3–4, БАН, София
2. Ножаров П. (2017), Пространствени и времевиизменения на климата в България през втората половина на XX веки началото на XXI век, Дисертационен труд за присъждане на научната степен ”доктор на географските науки”, 2017, БАН, Институт по геофизика, София
3. NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration,Space Weather Prediction Center, https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression
4. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), https://www.nrel.gov/solar/
5. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results p. 46
6. World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/

Session 4

Ecology and Risk Management

Chairmen: Prof. Garo Mardirossian

Secretary: Mihaela Tsvetkova, MS

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЕТО В ЕГИОН ОТ 15.6.1995 Г. И КОРИНТСКАТА СЕИЗМОГЕННА ЗОНА

Димитър Димитров

Национален институт по геофизика, геодезия и география (НИГГГ) – Българска академия на науките
e-mail: clgdimi@abv.bg

Ключови думи: *земетресения, GPS и InSAR данни, моделиране*

Резюме: *Представени са резултатите от изследвания на земетресението в Егион от 15.6.1995 г. и Коринтската сеизмогенна зона по данни от космическите технологии GPS и InSAR.*

STUDY OF EARTHQUAKE OF EGION 15.6.1995 END CORINTH SEISMOGENIC ZONE

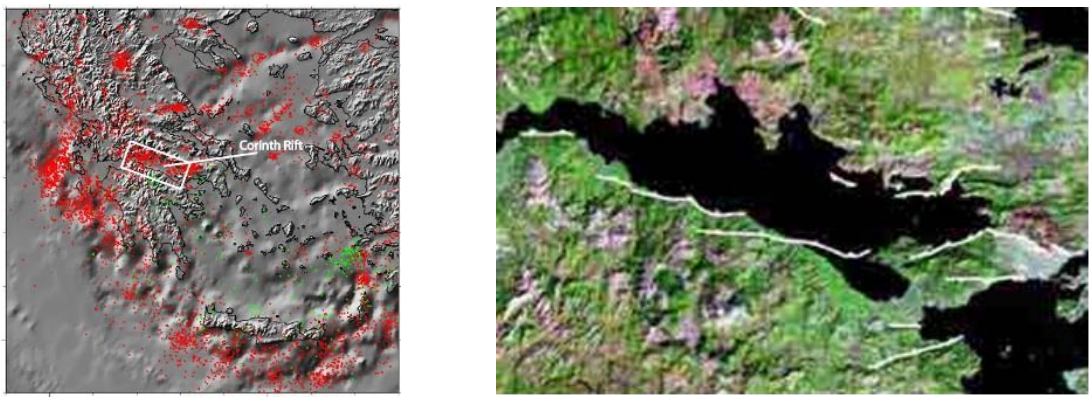
Dimitar Dimitrov

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: clgdimi@abv.bg

Key words*: Earthquakes, GPS data, modeling*

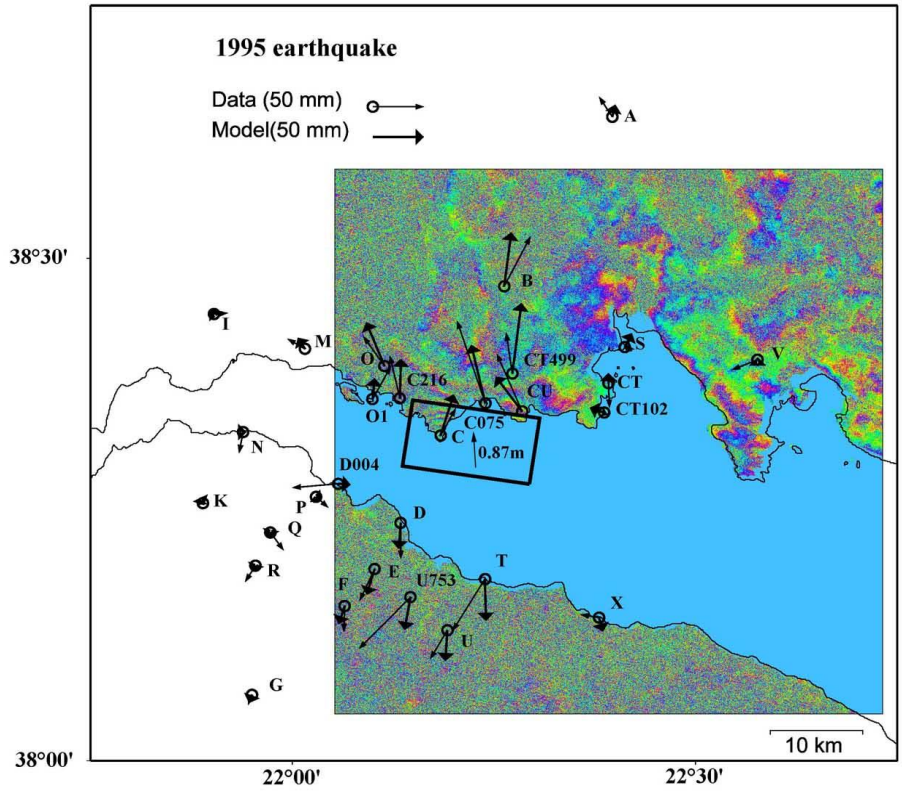
Abstact: *We present the results of study of Eigion 15.6.1995 earthquake end Corinth seismogenic zone by GPS and InSAR technology.*

Коринтският залив в централна Гърция е от най-активните вътрешно континентални структури в Европа. Този асиметричен грабен е ограден от активни разломи, предизвикали много катастрофални земетресения (Легион, 1861 с M = 7.0; Коринт, 1981 с M = 6.7), като само за последните 35 години 5 земетресения с M > 5.7, са довели до ко-сеизмични разкъсвания на земната повърхност [1] (Фиг. 1). В тази зона през 1991 г. Институтът по Физика на Земята (ИФЗ) Париж стартира мониторинг на регионалните тектонски движения. Стабилизирана и измерена с участието на автора е изследователска GPS мрежа от 24 станции. През 1993 г. се добавиха нови 11 станции и се преизмериха 24 от 1991 г. Повторните GPS измервания установиха, че Коринтският асиметричен грабен е подложен на екстензия N 0° ± 5° със скорост от 14 mm/год [1].



Фиг. 1. Коринтската сеизмогенна зона в регионален контекст със съвременната сеизмичност и спътникова снимка с маркирани главните разломи [2], представени с бели плътни линии

Именно тази сеизмогенна зона беше поразена от земетресението на 15 юни 1995 г. с Mw = 6.5 и координати на епицентъра 22.3° E и 38.4° N, h = 26 km, като най-големите разрушения и жертвите бяха в град Егион на южния бряг на залива. През 1995 г. се преизмериха GPS точките от 1991 и 1993 г. в/и около зоната и сравнението на данните от тези измервания позволиха да се определят хоризонтални ко-сеизмични премествания до 80 mm с грешка ± 4 mm и по двата борда на Коринтския залив Фиг. 2.



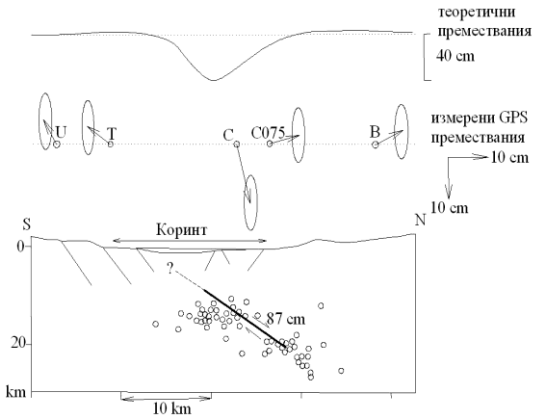
Фиг. 2. Сеизмогенната зона Коринт и районът на труса от 15.06.1995 г. Представени са ко-сеизмичните хоризонтални премествания на 24 точки, определени с GPS и ко-сеизмичните вертикални премествания, определени с InSAR. Моделните премествания са представени с плътни стрелки, а измерените ко-сеизмични премествания с тънки стрелки. Главният разлом на труса, е означен с правоъгълник, получен от най-доброто съвпадение на ко-сеизмичните с моделните премествания.

Анализът на данните за ко-сеизмичните премествания от GPS и InSAR технологиите чрез прилагане на усъвършенствания модел на Окада [2, 4], позволи да се реконструира механизмът на главния трус от 15.06.1995 г. и да се определят сеизмотектонските параметри на главния разлом :

- азимут (Strike) = 275°;
- наклон на разлома (Dip) = 38°;
- ъгъл на хлъзгане (Rake) = - 83°;
- величина на хлъзгане (Slip) = 0.87 m;
- дължина на разлома (2L) = 15 km;
- h min = 4.5 km и h max = 10 km;
- сеизмичен момент Mo = 3.9 x 10^{18} [Nm] и Mw = 6.5.

Тези параметри са близки до получените от френските сеизмотектоници в [3] параметри: азимут (Strike) 277°; наклон на разлома (Dip) 33°; ъгъл на хлъзгане (Rake) – 77°; величина на хлъзгане (Slip) = 0.87 m; дължина на разлома (2L) = 15 km; h_{min} = 4 km и h_{max} = 10 km; сеизмичен момент Mo = 3.4 x 10^{18} [Nm] и Mw = 6.3.

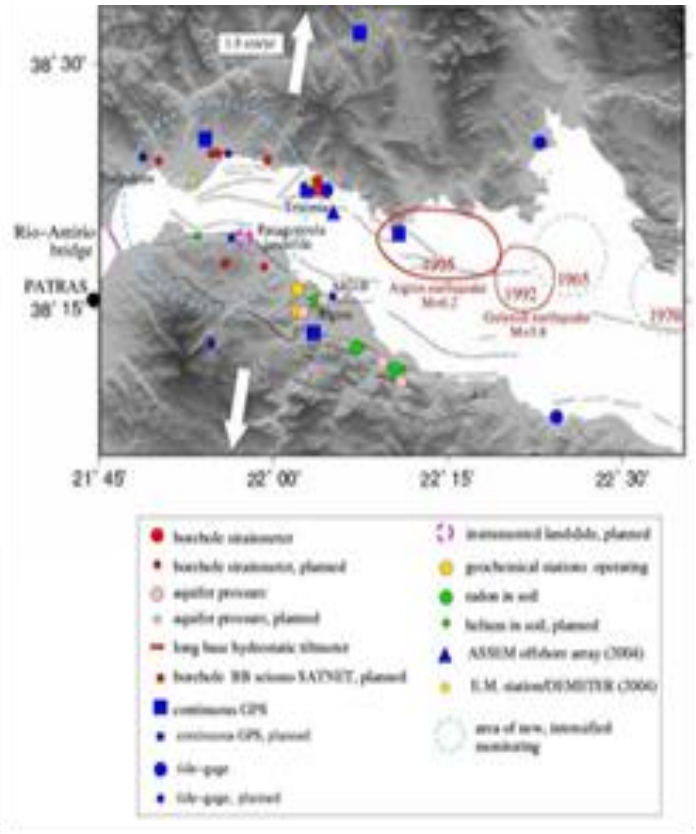
Получените нови параметри показват, че при това земетресение се е активирал един разсед с наклон 38° на север и с вектор на хлъзгане 0.87 cm, на 15 km от град Егион, по-близо до северният борд на залива (Фиг. 3).



Фиг. 3. Напречен разрез на Коринтската сеизмогенна зона през град Егион и връзката на полученият главен разлом със сеизмичността

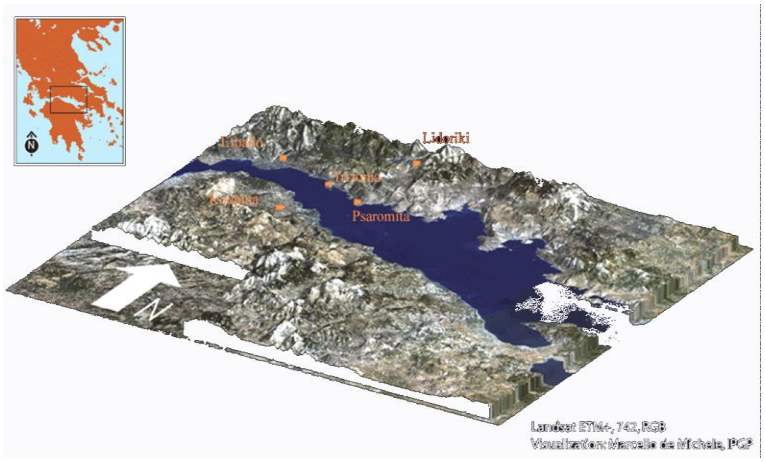
Изследването доказва, че един нормален разлом – разсед, които не е опознат и не е показан на Фиг. 1, с вероятна изява на дъното на залива, се е активирал и предизвикал труса от 15.06.1995 г. Определените нови параметри на този разлом изясняват по-точно физическия механизъм на земетресението, връзката на главният разлом със сеизмичността и показват значимостта на прилежените космически методи GPS и InSAR при изследване на сеизмогенни зони.

В тази сеизмогенна зона Институтът по физика на Земята, Париж организира многодисциплинарни изследвания, финансирани от Европейския съюз, с цел търсене на предвестници на силни земетресения (Фиг. 4).



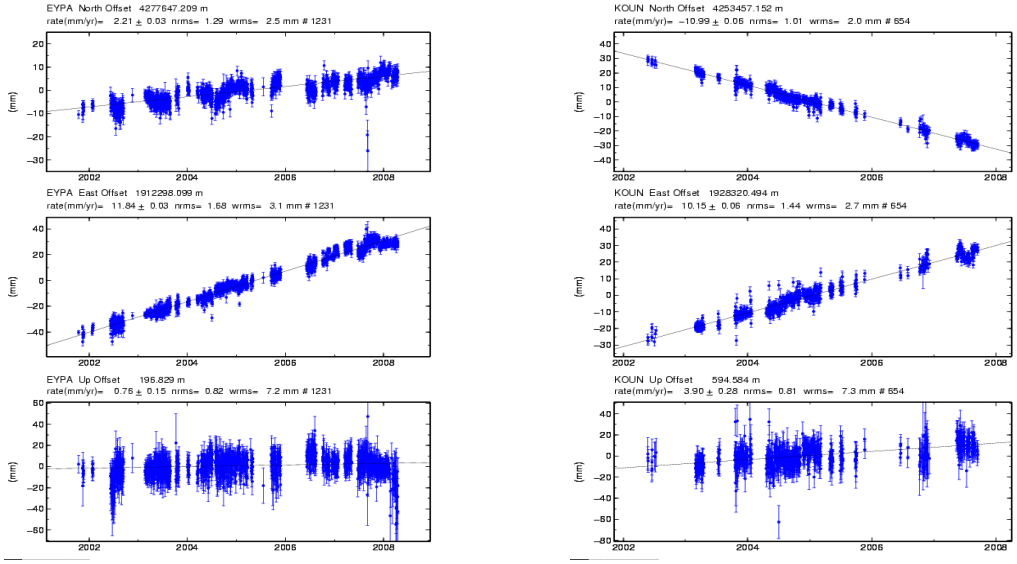
Фиг. 4. Коринтската сеизмогенна зона с означените трусове от 1965, 1970, 1992 и 15.06.1995 г. и зоната, около която са инсталирани различни инструменти за търсене на предвестници на силни земетресения

През 2002 г. в представената на Фиг. 4 зона, бяха инсталирани от двете страни на Коринтския залив първите 5 перманентни GPS станции с 30 s регистарция (Фиг. 5).



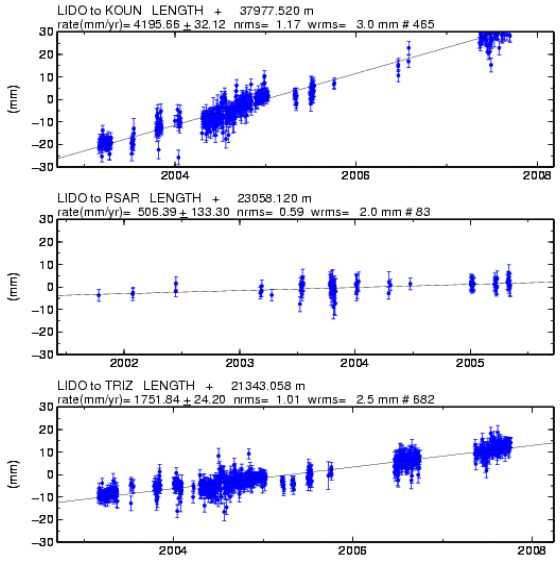
Фиг. 5. Коринтският залив с първите 5 постоянни GPS станции, инсталирани през 2002 г.

Времевите редове на две от постоянните GPS станции EYPA (Efpalio) и KOUN (Kounina) Фиг. 5, разположени от двете страни на залива, показват разнопосочни релативни скорости (ETRF2005, EPOCH 2000.0), на северните им компоненти, което потвърждава екстензията на Коринтския рифт Фиг. 6.



Фиг. 6. Времевите редове на две от постоянните GPS станции EYPA (Efpalio) и KOUN (Kounina) на двата бряга на Коринтския залив. Разнопосочните релативни скорости (ETRF2005, EPOCH 2000.0) на северните компоненти потвърждават разширяването на грабена.

На Фиг. 7 са представени промените на дължините между постоянните GPS станции от Фигура 6: LIDO (Lidoriki) и KOUN (Kounina); LIDO и PSAR (Psaromita, LIDO и TRIZ (Trizonia). Както се вижда от фигурата разстоянието (пространственият вектор) между станциите LIDO и KOUN Фиг. 7а, разположени от двете страни на Коринтският залив се удължава със скорост от 10 mm/год. Разстоянието между станциите LIDO и PSAR Фиг. 7б също се удължава, но с по-малка скорост. Дължината между станциите LIDO и TRIZ, Фиг. 7в, които са на северния борд на залива също се увеличава със скорост 6 mm/год. Тези движения, регистрирани след 2002 г., показват намаляване на тектонски напрежения в зоната на земетресението от 15.06.1995 г., но и доказват съвременната тектонска активност на главният разлом срещу гр. Егион Фиг. 4, със скорост от 10 mm/год.



Фиг. 7. Промени в дължините между постоянните GPS станции, представени на Фиг. 5.

Изводи и заключение

Анализът на получените с космически методи GPS и InSAR ко-сеизмичните премествания от земетресението от 15.06.1995 г. в района на гр. Егион, позволи да се определят по-точно сеизмотектонските параметри на активиралият се главен разлом. Определените параметри на този разлом изясняват физическия механизъм на земетресението, връзката на разломите със сеизмичността и показаха значимостта на прилежените методи.

Анализът на времевите редове от постоянните GPS станции Фиг. 6 и Фиг. 7, разположени от двете страни на залива, показват разнопосочни релативни скорости на северните им компоненти. Това потвърждава екстензията на Коринтският рифт, но и показва съвременната тектонска активност със скорост от 10 mm/год на главният разлом срещу гр. Егион Фиг. 4, довел до земетресението от 15.06.1995 г.

Изследването доказва, че нееднозначността на решенията от моделните изследвания може да се минимизира и отстрани чрез комплексно използване и съвместното анализиране на геодезически, тектонски и сеизмични данни. В случая GPS данните позволиха да се изучи връзката между земетресението, активната тектоника и индивидуалните разломи, с което дава информация за определяне на сеизмичната опастност в Коринтската сеизмогенна зона.

Литература:

1. Bernard, P., P. Briole, B. Meyer, H. Lyon-Caen, et al. (1997), The Ms=6.2, June 15, 1995 Aigion earthquake (Greece): evidence for low angle normal faulting in the Corinth rift, Journal of Seismology 1, 131–150
2. Okada Y. (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, B.S.S.A., 82, 1018–1040
3. Rigo A. (1994) Etude sismotectonique et geodesique du Golfe de Corint (Grece), Thesis, Paris -VII
4. Димитров Д. (2009) Геодезически изследвания на сеизмогенни зони, Дисертация дтн, ЦЛВГ, БАН.

ЗВЕЗДОТРЕСЕНИЯТА – ВИДОВЕ И СИЛА

Бойко Рангелов

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

Ключови думи: *Звездотресения, видове, определяне на магнитуда*

Резюме: *Описани са известни видове звездотресения, като основно внимание е обърнато на слънцетресенията. Използвана е аналогията на слънцетресенията с евентуални звездотресения на другите флуидни звезди. Споменато е и за възможни трусове очаквани на магнетари, пулсари и други видове неутронни звезди. За определяне на магнитуда на звездотресненията е приложен подход от сеизмологията – т.нар. „магнитуд по Рихтер“. По аналогия и чрез екстраполация са предложени енергетични еквиваленти на звездотресения очаквани на звезди от „главната последователност“, „червени и сини гиганти и супергиганти“, „бели и червени джуджета“ според класификацията на Hertzsprung-Russell.*

STELLARQUAKES – TYPOLOGY AND POWER

Boyko Ranguelov

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

Keywords: *Starquakes, stellarquakes, power*

Abstract: *Known types of starquakes are described, with a focus on sunquakes. The analogy of sunquakes with possible stellarquakes on other fluid stars is used. Possible quakes expected on magnetars, pulsars and other types of neutron stars are also mentioned. To determine the magnitude of the stellarquake, an approach from seismology has been applied – the so-called “Richter magnitude”. By analogy and extrapolation, energy equivalents of the stellarquakes expected for the “main sequence” stars, “red and blue giants and super giants”, “white and red dwarfs” according to the Hertzsprung-Russell classification have been proposed.*

Въведение

През последните години космическата сеизмология се развива интензивно [1] и въпросът с измерването на силата на извънземни сеизмични събития (Марс, Луна и др.) повдига проблем за оценка на магнитуда. Нещо повече – слънцетресенията бяха регистрирани и по този начин бяха поставени в дискусия как да се измери силата на сеизмичните събития, наблюдавани върху звездите и наречени звездотресения. Тъй като засега са регистрирани само слънцетресения (и някои взривове на неутронни звезди), е добре по някакъв начин да се въведе скалата за магнитуд на звездотресенията.

При оценката на силата (магнитуд), става дума единствено за звездотресения ставащи като сеизмични събития върху флуидните звезди.

За първи път проблемът с магнитуда на звездотресения на други флуидни звезди [3] (с изключение на Слънцето) се споменава в статията – „Слънцетресения: хелиосеизмичен отговор на слънчеви изригвания“ от Александър Г. Косовичев през 2014 година.

В дискусионен параграф „1.4 Предизвикателства при разбирането на слънчевите трусове“ в главата „Слънцетресения: хелиосеизмичен отговор на слънчеви изригвания“ той обсъжда проблемите на сеизмичните източници и реакциите на фотосферата към протуберансите при флуидните звезди.

Първите слънцетресения са наблюдавани от мисията SOHO, особено това от 9 юли 1996 г., когато е направена първата оценка на магнитуда [2]. След това е изследвана серия от слъцетресения за 24-ия слънчев цикъл (2011–2017) [4], като е създаден каталог на слънцетресенията [5], направена е статистика за честотата им и за много от техните свойства [4].

Все още източникът на слънцетресенията не е ясно дефиниран, съществуват няколко модела, които се опитват да се съобразят с наблюдателните данни. Някои обясняват механизма на генериране чрез удар отгоре върху фотосферата, други чрез изригвания от вътрешността на Слънцето, а има и по-екзотични предложения, като например т.нар. „холографска реконструкция“ [6].

Засега общ подход за оценка на магнитуда на звездотресенията на флуидните звезди чрез обща методология за оценка на силата им. Използвана е стандартната процедура за оценка на магнитуда и енергията на сеизмичните събития (земетресения), базирана на скалата за магнитуд на повърхностните вълни, разработена от Рихтер и Гутенберг през 30-те години на 20-ти век [7, 8].

Тук е извършена екстраполация при изследването за освобождаване на сеизмична енергия, за да се оцени нивото на очакваните магнитуди на звездотресенията и в крайна сметка да се оцени диапазонът на долната и горната граница, както и възможните вариации и неопределености в магнитудната оценка. Тези съображения се основават на прости математически зависимости, разумни физически предположения и обща методология за оценка на възможните магнитуди на звездотресенията.

Типология

За да се създаде последователно разбиране на за видовете сеизмични събития разглеждани тук е представена следната типология:

Земетресения – сеизмични събития на Земята

Магнитуд на земетресенията – логаритмична скала, създадена от Рихтер и Гутенберг за измерване на силата на земетресенията (за подробности вижте следващия параграф). Увеличение от 1 единица магнитуд означава земетресение с около 32 пъти по-силна мощност [9, 10].

Звездотресения – сеизмични събития (наричани често „смущения“) върху неутронни/пулсарни/магнетарни/компактни звезди. Тези звезди са съставени от супер твърда кора и свръх флуидна вътрешност [11]. Звездотресението е внезапно пренареждане на кората на звездата [12]. Характеризира се с разрушаване на кората, генериране на гравитационни вълни и интензивни гама и рентгенови емисии. Като цяло има две основни сеизмични събития върху тези звезди – първото, разрушаване на кората, последвано от звездни колебания след звездотресения, [13, 14], и второ, образуване на еластични планини върху въртящите се компактни звезди [16]. За изучаване на енергийния бюджет на такива звезди се използва сложен математически апарат, за да се получи реализираната енергия и да има коректни резултати и оценка на разпределението на енергията на множество различни събития, ставащи на подобни звезди [13]. Най-силното измерено звездотресение е регистрирано на 27 декември 2004 г. То освобождава толкова много енергия, че ако се случи на Земята, би било еквивалентно на земетресение с магнитуд 32 по Рихтер (т.е. ако се приеме, че тази скала е използвана за измерване на звездотресението) [17].

Звезден магнитуд – е историческа единица за звездна яркост и нейното определение гласи, че промяна от 5 стойности представлява коефициент 100 в интензитета на яркостта [18].

Слънцетресения – това са сеизмични събития, характеризиращи се с разпространение на повърхностни сеизмични вълни, генерирани от слънчеви изригвания. Не всички слънчеви изригвания генерират слънцетресения (те са около 10–20% от всички изригвания) [3].

Хелиосезимология – дял от астрофизиката, който изследва вътрешната структура на Слънцето чрез изучаване на трептенията на повърхностните му вълни. Средният период на трептенията е около пет минути, което съответства на честота от около 0,003 Hz [19].

Флуидни звезди – тези звезди са подобни на Слънцето. Тук изследването е съсредоточено за определяне на силата (магнитуда) на тези повърхностни сеизмични вълни се оценява чрез апроксимация, екстраполация и аналогия със земетресенията и повърхностните вълни на Земята.

Звездотресения – сеизмични събития, наблюдавани на повърхността на флуидни звезди. За целите на тази разработка единственото изследване е проведено, като се вземат предвид повърхностните сеизмични вълни, генерирани от изригвания и евентуално видими върху фотосферата на флуидни звезди. Всички оценки са калибрирани спрямо слънцетресенията.

Астросеизмология – част от астрофизиката, изучаваща сеизмични събития и трептения върху звезди, планети, спътници и други земни и неземни космически обекти [19].

Математически съображения

Теорията за определяне на магнитуда на земетресенията е добре развита и се основава на логаритми, на зависимости между периодите и амплитудите на сеизмичните вълни записани от сеизмографи. Тази теория е добре описана в трудовете на Рихтер и Гутенберг (и на други изследователи) и затова няма да се спираме тук. Само е важно да се отбележи, че има емпирична връзка между магнитуда определен по повърхностни вълни и сеизмичната енергия която те пренасят и тази връзка се дава от:

(1) $\log E_S = 4.4 + 1.5\,Me$

и

(2) $Me = (\log E_S - 4.4)/1.5$

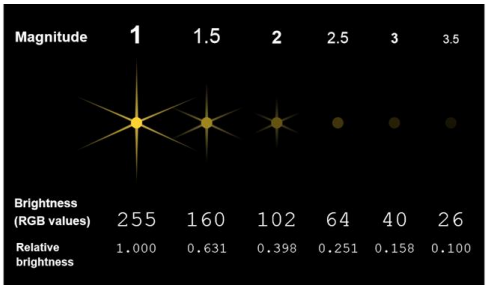
където където Es е енергията на земетресението в джаули, Ме – се нарича енергиен магнитуд Това означава, че тази величина се изчислява, използвайки емпиричната зависимост Es-Ме [10].

Връзката между джаул и ерг е: 1 джаул = 10^7 ерга

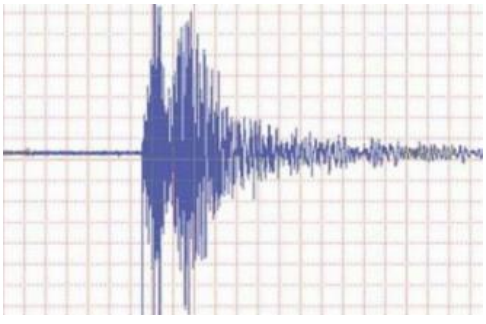
Логаритмичната скала използвана при тези релации означава, че промяна на магнитуда от 1 единица, показва че реализираната енергия се променя около 32 пъти. Така че звездотресение с магнитуд 32 (регистрирана експлозия на неутронна звезда – 27 декември 2004 г.) би бил около 580 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 пъти по-мощен от земетресението с магнитуд М1.0). Видимото регистрирано слънцетресение на 9 юли 1996 г. е имало магнитуд по Рихтер от 11.3. Това означава, че сеизмичното събитие на Слънцето е било около 30 000 пъти по-мощно от турското земетресение на 6 февруари 2023 г. с М7.8.

Физически съображения

В началото на 30-те години на 20-ти век Чарлз Франсис Рихтер от Калифорнийския технологичен институт, вдъхновен от магнитуда на звездите, базиран на интензитета на светлинното излъчване (фиг. 1), разработва скала за магнитуд на земетресенията, за да оцени силата на сеизмичните събития, базирана на сеизмографските записи на сеизмичните вълни. Няколко години по-късно, заедно с Бено Гутенберг, създава първите таблици с калибровъчни функции, за да увеличи точността на оценката на магнитуда на земетресенията в далечното поле, използвайки повърхностните вълни като основен носител на сеизмична енергия [8] Фиг. 2.

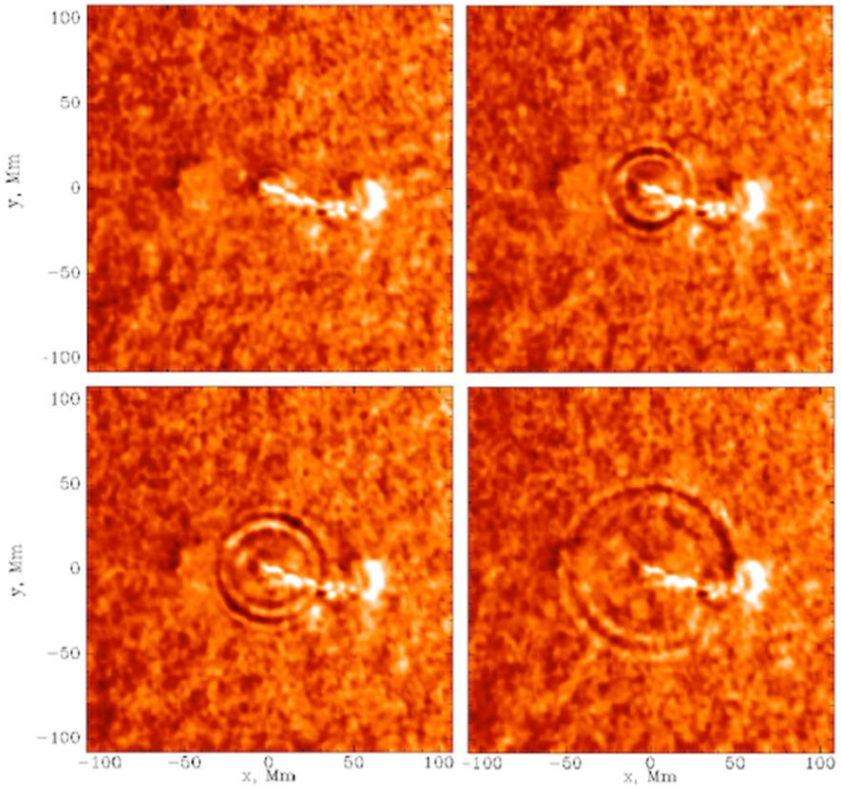


Фиг. 1. Скала на звездния магнитуд според яркостта на небесни обекти [18]



Фиг. 2. Типична сеизмограма

Както се вижда от графиките, „раждането“ на скалата на Рихтер се основава на математическите предположения, представени по-горе. Логаритмичната скала е изключително полезна при подобни изследвания, защото обхваща много широк динамичен диапазон. Опитът от земетресенията показва добре последващото разпространение на енергията и дава възможност за сравняване на енергията на различни видове сеизмични събития. Точно това свойство е използвано при трансформациите между енергия и магнитуд при Слънцетресенията.



Фиг. 3. Повърхностни сеизмични вълни при слънцетресението от 9 юли, 1996 г. регистрирано от мисията СОНО [21]

Много изследвания споменават различни свойства на слънцетресенията, а обобщение на сеизмичните повърхностни вълни върху Слънцето показва:

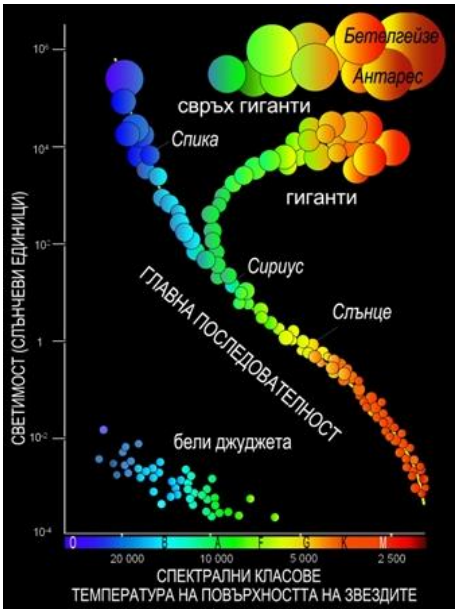
- Повърхностните вълни се разпространяват на сходни разстояния (приблизително 10 Мм – около 10 диаметъра на Земята, в зависимост от силата на слънчевото земетресение).
- Ускоренията за тези изследвани случаи [4] варират между 0,011–0,020 km/s^2.
- Времената за пътуване на наблюдаваните повърхностни вълни са между 30–60 минути, докато се разсеят до нивото на микросеизмичния шум на Слънцето със скорост от десетки km/s до около стотици km/s.
- Честотата на повърхностните вълни на слънцетресенията варира, но е в диапазона от 2 до 6 MHz (3 MHz за събитието от 1996 г.).
- Диапазонът на магнитудите варира между 8–9 единици магнитуд до 13–15 единици за слънцетресенията земетресения, подкрепен от 9 „видими“ наблюдения на слънцетресения, измерени по време на 24-ия цикъл на слънчева активност [4].
- Както беше споменато по-рано слънцетресението от 9 юли 1996 г. е довело до появата на видими повърхностни вълни във фотосферата на слънцето. Трансформацията на сеизмичната енергия, пренасяна от вълните, е с магнитуд „Рихтер-Гутенберг“ от 11,3 [3].
- Много важно е да се отбележи, че само около 15–20% от протуберансите на Слънцето, генерират слънцетресения. Защо това е така е все още необяснимо.

Основни параметри на флуидните звезди

Общата класификация на звездите е представена чрез H-R (Херцшпрунг-Ръсел) диаграмата – Фиг. 4. Тя показва връзката между повърхностната температура на звездите и тяхната светимост в слънчеви единици.

Като цяло, дисперсията на параметрите нормирани по Слънцето е:

- Повърхностна температура: 3000 K – 50000 K;
- Светимост: 10^{-6} Lo – 10^{6} Lo;
- Радиус: 0.01 Ro – 800 Ro;
- Маса: 0.08 Mo – 80 Mo.



Фиг. 4. Диаграмата H-R на (Херцшпрунг-Ръсел) показва разпределението на звездните спектрални класове (O-M), според светимостта и температурата на флуидните звезди

Доминиращият брой звезди с маси в интервала от 0,25 до 2 маси на Слънцето е около 90%. Това означава, че фокусът на нашето изследване е основно насочен върху дясната част на H-R диаграмата, която съдържа по-голям брой флуидни звезди.

Основните допускания при изследването са:

- Оценката на магнитуда на звездотресенията върху флуидните звезди се основава само на повърхностните сеизмични вълни.
- Оценката по тази скала на магнитуда не включва енергийния бюджет, произведен от всички други възможни източници на излъчване на енергия на флуидната звезда (например гама и рентгенови лъчи, плазмени изригвания, магнитни смущения и др.).
- Флуидът, в който се разпространяват повърхностните вълни, се счита за хомогенен.
- Слънцетресенията са основният калибриращ фактор, тъй като техния магнитуд се оценява чрез директни измервания. Например, изригването със средна сила на 9 юли 1996 г. предизвика слънцетресения с магнитуд 11,3 по скалата на Рихтер.
- Генерационният потенциал на флуидните звезди се приема пропорционален на техния размер.

Методология за оценка на силата на звездотресенията

Методологията за оценка на магнитудите на звездотресенията се основава на няколко основни принципа:

- Следвайки свойствата на флуидните звезди, линейната екстраполация и интерполация се считат за достатъчно представителни за оценка на магнитудите на звездотресенията. Това се потвърждава от многобройни изследвания и резултати на енергията на слънцетресенията, излъчвана и пренасяна от сеизмичните повърхностни вълни генерирани от тях.

- Типологията на звездите позволява да се предположи, че потенциалът на мощността на звездотресенията е пропорционален на размерите, масите, температурите и позицията на звездите на диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел. Това дава възможност за оценка на магнитуда на звездотресенията за спектралните класове O-M (на главната последователност). Гигантите, свръхгигантите и белите джуджета се нуждаят от подобен подход, но за всяка група поотделно.
- Използване на подхода на Рихтер-Гутенберг за оценка на магнитуда на земетресенията чрез повърхностни вълни (т.е. логаритмична скала) за голям динамичен диапазон, е приложен върху звездотресения.
- Калибриране на слънцетресенията за всички звездотресения е възможно, тъй като слънцетресенията са по-добре изследвани и имат достатъчна статистическа тежест, за да се считат за надеждни.
- Независимата оценка на горните и долните граници на възможните звездотресения е доказана чрез независими методи (особено за слънцетресенията) и екстраполирана към спектралните класове на другите звезди.

Този методологичен подход дава общ интегриран поглед върху оценката на магнитудите на звездотресенията и диапазона на техните вариации. Това би могло да бъде много полезно, при планирането на наблюденията на различни мисии, насочени към изучаване на явленията, наречени звездотресения. Появяват се данни че телескопът „Джеймс Уеб“ вече регистрира явления върху флуидни звезди, приличащи на звездотресения.

Резултати при оценка на силата на звездотресенията

Използвайки описаната методология и вземайки предвид математическите и физическите допускания, са оценени интервалите на възможните магнитуди на звездотресенията, като са калибрирани всички стойности и са определени трансформациите им в сеизмична енергия и обратно.

Подобен подход е приложен за звездните обекти от всички спектрални класове, класифицирани чрез H-R диаграмата (с изключение на неутронни/пулсари/магнетари/ компактни звезди).

Както бе споменато по-рано, механизмът на генериране на звездотресения е спорен, но повечето учени, считат източника им, като експлозия вътре в звездното вещество водещи до протуберанси, подобни на слънчевите.

В това изследване не се разглежда механизмът на генериране на звездотресенията. Разглеждат се само повърхностните сеизмични вълни и възможните магнитуди са изчислени чрез техните параметри. Както е показано по-рано, логаритмичната скала може да бъде представителна за сравняване на оценените магнитуди на звездотресенията. За да може да се представи визуално направената оценка, е създадена Таблица 1. Тя дава възможност за изготвяне на схеми за магнитудите на звездотресенията и диапазоните на техните вариации. Поради големите неопределености, хипотетичните Mmax и Mmin също имат по-големи вариации в стойностите си.

Таблица 1. Приблизителна хипотетична средна оценка на магнитуда на звездотресенията и очакван диапазон, определени от зависимостта на типовете флуидни звезди, съгласно диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел и магнитуда „по Рихтер“ на повърхностните вълни

Спектрален клас	**Среден магнитуд**	**Максимален магнитуд**	**Минимален магнитуд**	**Диапазон**	**Типове звезди**
A–K	9,7–11.7	14.6–15.0	7.0–9.0	8 единици	Главен ред
K–M	9.0–10.0	10.5–11.5	6.0–6.5	4.5 единици	Главен ред R
O–A	10.0–12.0	15.0–17.5	7.5–8.5	10 единици	Главен ред L
G–M	12.0–14.0	14.0–15.0	9,5–10.5	5.5 единици	Гиганти
G–M	18.0–20.0	20.0–25.0	17.0–18.0	8 единици	Червени супергиганти
B–A	18.0–20.0	20.0–25.0	17.0–18.0	8 единици	Сини супергиганти
B–G	8.5–9.5	10.0–10.5	6.0–6.5	4.5 единици	Бели джуджета

Легенда: A–K е частта от главната последователност (Слънце и подобни); K–M е част от главната последователност: (R) – разположена вдясно от A–K (малки маси и ниски температури), O–A е част от главната последователност (L) – разположена вляво от A–K (големи маси и високи температури) – всичко според диаграмата Херцшпрунг-Ръсел.

Заключение

Представена е стандартна типология на различните видове звезди. Разработена е методология за оценка на силата на звездотресенията, използваща основите за определяне на магнитуда на земетресенията. Приложена е процедура за екстраполация, за да се разшири обхватът за оценка на силата на звездотресенията, възможни върху флуидни звезди, чрез метод на трансформация на повърхностните сеизмични вълни в енергия и обратно.

Използвана е H-R диаграма и е направено предположение за класификация по магнитуд-размер на звездотресенията, за да се оцени хипотетичния среден очакван магнитуд на звездотрезенията, както и възможните вариации относно точността на оценката.

Създадена е практическа таблица, изразяваща тези зависимости. Те могат да бъдат полезни при планирането на космически мисии, насочени към регистрация и наблюдение на звездотресения. В светлината на новите данни от „Solar Orbiter" за по-точните данни за слънцетресенията и слънчевите смущения влияещи на Земята.

Литература:

1. Ranguelov B. Space Seismology. Peer Rev J Sol Photoen Sys. 2 (5). PRSP. 000547. 2024. https://crimsonpublishers.com/prsp/pdf/PRSP.000547.pdf
2. https://www.cnet.com/science/space/scientists-spot-first-sunquake-of-the-current-solar-cycle/
3. Kosovichev A., 2014. Sunquakes: helioseismic response to solar flares., "Extraterrestrial Seismology", Cambridge Univ. Press, 23 pp. arXiv:1402.1249v1
4. Quinn S., M. Mathioudakis, David B. Jess., Flare-induced Sunquake Signatures in the Ultraviolet as Observed by the Atmospheric Imaging Assembly., The Astrophysical Journal, 920:25 (10 pp), 2021. https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0139
5. Sharykin I., Kosovichev A., Sunquakes of Solar Cycle 24., The Astrophysical Journal, 895:76 (14 pp), 2020 May 20 https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab88d1
6. Stefan T. and Kosovichev A., 2020, Estimation of Key Sunquake Parameters through Hydrodynamic Modeling and Crosscorrelation Analysis., The Astrophysical Journal, 895:65 (15 pp), 2020 May 20 https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab88ae
7. Gutenberg, B., and C.F. Richter (1936). On Seismic Waves, Gerlands Beitrage zur Geophysik, 47, 73-131.
8. Gutenberg B. and Charles Francis Richter., Magnitude and energy of earthquakes., Annali di Geofisica, Vol. 9, n. 1, 1956. file:///C:/Users/pc/Downloads/Gutenberg_2010.pdf
9. Kayal J.R.., EARTHQUAKE MAGNITUDE, INTENSITY, ENERGY, POWER LAW RELATIONS AND SOURCE MECHANISM., USGS Science Center., 40pp. https://escweb.wr.usgs.gov/share/mooney/SriL.II3.pdf
10. Choy G. and John L. Boatwright., Radiated seismic energy and energy magnitude. Version August 2002; editorially adapted and amended July 2012; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.6
11. Anderson, P. W. ; Itoh, N., Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon., Nature, Volume 256, Issue 5512, pp. 25–27 (1975). DOI:10.1038/256025a0
12. Baym, G. ; Pines, D., 1971. Neutron starquakes and pulsar speedup., Ann. Phys. (USA), Vol. 66, p. 816–835 DOI:10.1016/0003-4916(71)90084-4
13. Lu, Ruipeng; Yue, Han; Lai, Xiaoyu; Wang, Weihua; Zhang, Shenjian; Xu, Renxin.,2023. Quakes of compact stars., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 520, Issue 3, pp. 4289–4300., doi:10.1093/mnras/stad270
14. Ashton G., R. Prix, and D. I. Jones., Statistical characterization of pulsar glitches and their potential impact on searches for continuous gravitational waves., PHYSICAL REVIEW D 96, 063004 (2017)., DOI: 10.1103/PhysRevD.96.063004
15. Litvinenko, Y. A New Model for the Distribution of Flare Energies., Solar Physics, Volume 167, Issue 1–2, pp. 321–331. doi: 10.1007/BF00146342
16. Gangwar., Y. David Ian Jones ., Applying the starquake model to study the formation of elastic mountains on spinning neutron stars., MNRAS 532, 2763–2777 (2024) https://doi.org/10.1093/mnras/stae1671
17. https://en.wikipedia.org/wiki/SGR_1806%E2%88%9220#cite_note-5
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Magnitude_%28astronomy%29
19. http://astrothesaurus.org/uat/709
20. https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/seismograph
21. http://soi.stanford.edu/press/agu05-98/press-rel.html

TERRAIN SURFACE COMPLEXITY DERIVED BY REMOTE SENSING: A CASE STUDY OF BULGARIA

Rosen Iliev, Boyko Ranguelov, Lachezar Filchev

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: ilievrosen88@abv.bg, branguelov@gmail.com, lachezarhf@space.bas.bg

Key words: *Bulgaria, nested-means, landforms, DTM, terrain, fractal dimension*

Abstract: *Digital Terrain Models (DTMs) offer a robust framework for quantitative landform analysis by integrating high-resolution elevation data and morphometric parameters. This study applies the unsupervised nested-means algorithm to classify the topography of Bulgaria (41°14' and 44°13' N; 22°21' and 28°36' E) into sixteen distinct terrain surface types, based on slope gradient, surface convexity, and texture. Each morphometric class is further evaluated using the box-counting method for estimating fractal dimension (D), as a measure of surface complexity. The results reveal a strong correlation between slope steepness, texture fineness, and convexity with the fractal dimension, indicating that steeper and fine-textured terrains with high convexity exhibit higher degrees of geomorphological complexity. Conversely, gentle slopes with fine texture display the lowest D values, signifying smoother terrain morphology. The classification highlights the heterogeneous nature of Bulgaria's terrain, shaped by tectonic, erosional, and depositional processes.*

СЛОЖНОСТ НА РЕЛЕФНАТА ПОВЪРХНОСТ ИЗВЛЕЧЕНА ЧРЕЗ ДИСТАНЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ: КАЗУС ОТ БЪЛГАРИЯ

Росен Илиев, Бойко Рангелов, Лъчезар Филчев

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: ilievrosen88@abv.bg, branguelov@gmail.com, lachezarhf@space.bas.bg

Резюме: *Цифровите модели на релефа (Digital Terrain Models, DTMs) предоставят надеждна основа за количествен морфометричен анализ чрез интегриране на данни с висока разделителна способност за надморската височина и релефни параметри. В настоящото изследване е приложен алгоритъмът на ненаблюдавани вложени средни стойности (unsupervised nested-means algorithm) за класифициране на релефа на България (41°14' – 44°13' N; 22°21' – 28°36' E) в шестнадесет морфометрично обособени типа повърхности, дефинирани на база наклон, изпъкналост и текстура. Всяка от класовете е допълнително оценена чрез метода на броене в кутии (box-counting) за изчисляване на фракталната размерност (D) като индикатор за сложност на релефната повърхност. Резултатите разкриват отчетлива корелация между стръмност, текстурна финост и изпъкналост с фракталната размерност, като показват, че стръмните, финно-текстурирани и силно изпъкнали терени се характеризират с по-висока степен на геоморфоложка сложност. Обратно, полегатите склонове с по-гладка текстура демонстрират най-ниски стойности на D, което свидетелства за по-изгладена морфология. Класификацията подчертава хетерогенния характер на българския релеф, резултат от взаимодействието между тектонски, ерозионни и седиментационни процеси.*

Introduction

Digital Terrain Modelling (DTM) plays a foundational role in contemporary geomorphological analysis, offering precise, scalable, and replicable representations of Earth's surface morphology. As an extension of digital cartography and remote sensing, DTM has transformed the way geomorphologists conceptualize and quantify landform features, moving from qualitative, field-based interpretation to high-resolution numerical models that support spatially explicit and multi-scale analysis (Evans, 2012; Hengl & Reuter, 2009). A DTM is a digital representation of the Earth's bare surface, typically constructed from elevation data obtained via remote sensing techniques such as

LiDAR, photogrammetry, radar interferometry, or satellite altimetry (Wilson & Gallant, 2000). It provides the foundation for a wide array of terrain derivatives, including slope, aspect, curvature, flow accumulation, and topographic wetness index, which serve as inputs for geomorphological, hydrological, and ecological models.

In geomorphology, DTMs enable the quantitative analysis of landforms, allowing for systematic classification, process modelling, and landscape evolution studies. For instance, detailed curvature analysis of a DTM can reveal erosional vs. depositional regimes, while slope and aspect support assessments of hillslope stability, solar radiation balance, and soil redistribution (Minár & Evans, 2008). Moreover, multi-resolution analysis using DTMs allows researchers to examine both fine-scale microtopography and large-scale tectonic or fluvial structures within a unified framework (Florinsky, 2012).

DTMs also serve as the input layer for terrain classification algorithms, including both supervised and unsupervised approaches. For example, geomorphometric classification schemes like the Iwahashi and Pike method (2007) and the Geomorphons approach (Jasiewicz & Stepinski, 2013) rely heavily on DTM-derived morphometric variables to segment terrain into meaningful units based on form, process, or genesis.

Despite their strengths, DTMs are not without limitations. The accuracy of a DTM is highly dependent on the resolution, sensor quality, and terrain complexity. Therefore, careful pre-processing, error assessment, and appropriate scale selection remain essential components of DTM-based geomorphological research (Wechsler, 2007).

In conclusion, Digital Terrain Modelling has revolutionized the field of geomorphology by enabling detailed, objective, and reproducible terrain analysis across spatial and temporal scales. It supports both fundamental research on landform dynamics and applied studies in natural hazard assessment, land management, and environmental monitoring. By incorporating fractal analysis as a modern mathematical tool, this study introduces an innovative approach that provides a novel perspective on the subject.

Study area

The object of present study is topography of Republic of Bulgaria (Fig. 1). Bulgaria is located in Southeastern Europe, occupying the eastern part of the Balkan Peninsula. It lies approximately between 41°14′ and 44°13′ N latitude, and 22°21′ and 28°36′ E longitude, covering a total area of about 111,000 km². The country is bordered by Romania to the north (along the Danube River), Serbia and North Macedonia to the west, Greece and Turkey to the south, and the Black Sea to the east.

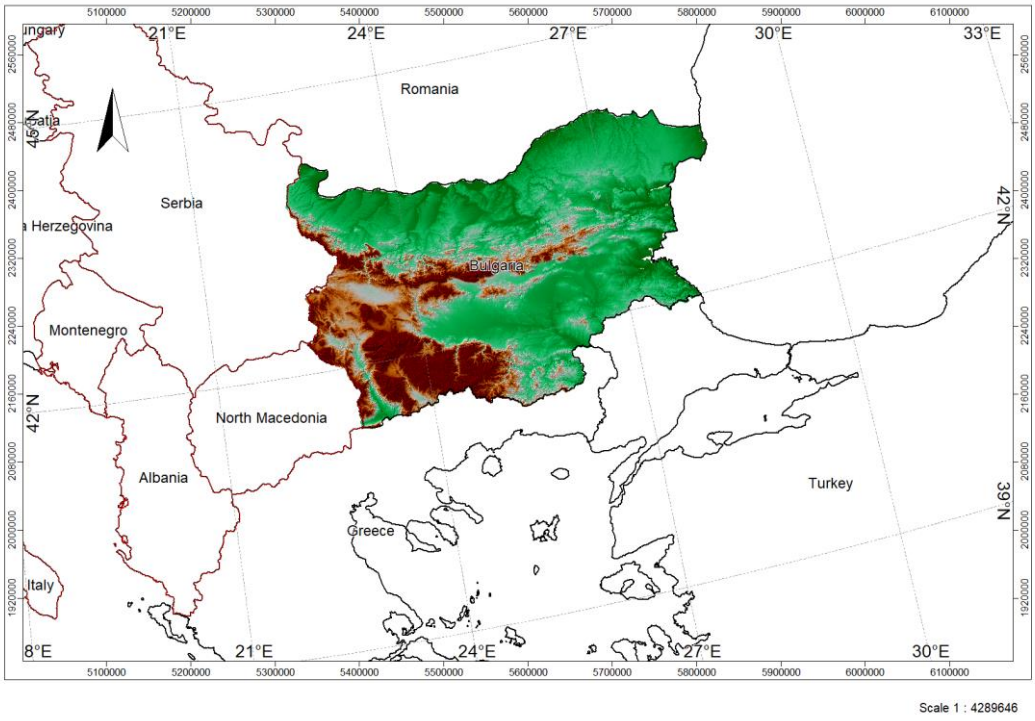


Fig. 1. Location map of the study area

Topographically, Bulgaria exhibits pronounced relief diversity, dominated by alternating mountain ranges, basins, and plains. The Balkan Mountains (Stara Planina) run horizontally through the center of the country, forming a natural climatic and geographic divide. To the south, the Rila, Pirin, and Rhodope Mountains form part of the Alpine orogenic system, with Musala Peak (2,925 m) in Rila being the highest point in both Bulgaria and the entire Balkan Peninsula.

Northern Bulgaria is primarily composed of the Danubian Plain, characterized by gently rolling terrain and loess plateaus. In contrast, the Upper Thracian Plain in the south-central region is a lowland basin known for fertile soils and agricultural use. The Struma and Maritsa river valleys provide key lowland corridors and are aligned with active tectonic zones and grabens, contributing to both seismic activity and geomorphological complexity. This combination of mountains, plains, and river systems results in a highly fragmented relief, offering a rich context for geomorphological classification, terrain modelling, and land use analysis.

Methods and Data

Unsupervised nested-means algorithm for terrain surface classification

Within the present research the terrain surface analysis and classification have been performed using the so called „nested-means terrain classification". The unsupervised nested-means algorithm developed by Iwahashi and Pike (2007) represents a data-driven, objective methodology for classifying landform types based solely on digital elevation model (DEM) derivatives. Unlike traditional geomorphological classifications which often rely on subjective interpretation and qualitative parameters, this algorithm utilizes a hierarchical clustering approach to categorize the land surface according to its morphometric properties.

At the core of the method is the extraction of three primary terrain variables derived from DEM data: slope gradient, surface convexity, and surface texture. Slope gradient and convexity are calculated using standard digital terrain analysis techniques, while surface texture is defined by the local standard deviation of elevation within a fixed-size moving window, typically 3 × 3 or 7 × 7 pixels (Iwahashi & Pike, 2007).

The nested-means algorithm applies a non-hierarchical k-means clustering approach iteratively. First, the terrain is partitioned into coarse classes using k-means clustering in the multivariate space defined by the three morphometric variables. Subsequently, each initial cluster is further subdivided by applying k-means clustering again within its data subset. This nesting procedure is repeated until a predefined number of classes is achieved or until further subdivision yields no significant improvement in classification homogeneity (Iwahashi & Pike, 2007).

The final output consists of automatically derived terrain classes that can be broadly interpreted in terms of geomorphological features such as mountains, hills, plains, and depressions. These classes correspond to common topographic patterns, but their identification is based entirely on statistical properties rather than semantic labels. Notably, the authors demonstrate that a classification into 16 terrain types provides an effective compromise between generalization and detail, useful for continental- and regional-scale applications (Iwahashi & Pike, 2007).

The Box-counting Method for Fractal Dimension Estimation

Surface complexity analysis is based on classical tool for fractal analysis – "box-counting method". The box-counting method is one of the most widely used techniques for estimating the fractal dimension (D) of irregular spatial patterns, particularly in geographical and geomorphological analyses. It is especially suited for analysing complex natural structures such as coastlines, drainage networks, topographic surfaces, and land cover boundaries (Mandelbrot, 1983; Lam & De Cola, 1993).

The basic principle of the method involves overlaying the object or binary raster with a grid of square boxes of size ε, and counting the number of boxes N(ε) that contain part of the object. This process is repeated for progressively smaller box sizes. The fractal dimension D is then estimated using the logarithmic relationship:

$$\text{Fractal Dimension } (D) = \log(N(\varepsilon)) / \log(1/\varepsilon) \quad (1)$$

Where:
- N(ε) is the number of boxes of size ε that contain part of the object.
- ε is the side length of the box (scale).
- D is estimated as the slope of the linear regression line in a log-log plot of N(ε) versus 1/ε.

In practice, a log-log plot of N(ε) versus 1/ε is constructed, and the slope of the linear portion of the curve is taken as an estimate of D. The closer the fit (often measured by the coefficient of determination R^2), the more reliable the dimensions estimate are.

The box-counting dimension reflects the scale-invariance and space-filling capacity of the analysed object. For instance, a value of D close to 2 indicates a highly fragmented, space-filling structure on a 2D surface, while values closer to 1 imply linear or less complex patterns.

This method has been effectively applied to digital elevation models (DEMs), where elevation contours or slope threshold masks are binarized, enabling fractal analysis of terrain roughness and landform complexity (Sánchez et al., 2006; Florinsky, 2012).

DEM data

Terrain surface analysis of the study area was performed using digital elevation data acquired by EU-DEM v1.1. The EU-DEM v1.1, developed under the Copernicus Land Monitoring Service, is a pan-European digital surface model (DSM) with a 25-meter spatial resolution. It is derived through the fusion of two global elevation datasets: the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) and ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). The fusion process involved weighted averaging, void-filling, and smoothing to ensure consistency across Europe's diverse landscapes (EEA, 2019).

EU-DEM data are referenced to the ETRS89 / LAEA Europe projection (EPSG:3035) and are distributed in 1° × 1° tiles. As a DSM, it includes elevation values that reflect not only ground surface but also vegetation and built structures. While this may limit its use for bare-earth analyses, it remains highly valuable for regional-scale terrain modelling, hydrological assessments, and landform classification.

Results and Discussion

The results obtained in this study are summarized in Table 1 and Figure 2. The main conclusions and interpretations are discussed further.

Table 1. Terrain surface classification within the study area. The numbering of the terrain classes is in accordance with the original nomenclature of Iwahashi and Pike (2007)

№	Name of class	Area (km^2)	Share of total area (%)	D
1	very steep slope, fine texture, high convexity	9869.7675	14.91	1.53
2	very steep slope, coarse texture, high convexity	3331.7194	5.03	1.39
3	very steep slope, fine texture, low convexity	7502.9450	11.33	1.51
4	very steep slope, coarse texture, low convexity	3710.1213	5.60	1.41
5	steep slope, fine texture, high convexity	3974.5006	6.00	1.44
6	steep slope, coarse texture, high convexity	5126.9825	7.74	1.47
7	steep slope, fine texture, low convexity	3677.6869	5.55	1.42
8	steep slope, coarse texture, low convexity	5121.4094	7.73	1.47
9	moderate slope, fine texture, high convexity	1311.5325	1.98	1.16
10	moderate slope, coarse texture, high convexity	4603.0156	6.95	1.46
11	moderate slope, fine texture, low convexity	1128.1831	1.70	1.12
12	moderate slope, coarse texture, low convexity	4129.5394	6.24	1.44
13	gentle slope, fine texture, high convexity	474.4788	0.72	0.92
14	gentle slope, coarse texture, high convexity	5871.4144	8.87	1.46
15	gentle slope, fine texture, low convexity	782.1044	1.18	0.99
16	gentle slope, coarse texture, low convexity	5597.5606	8.45	1.43
–	**Total**	**111000.00**	**100.00**	**–**

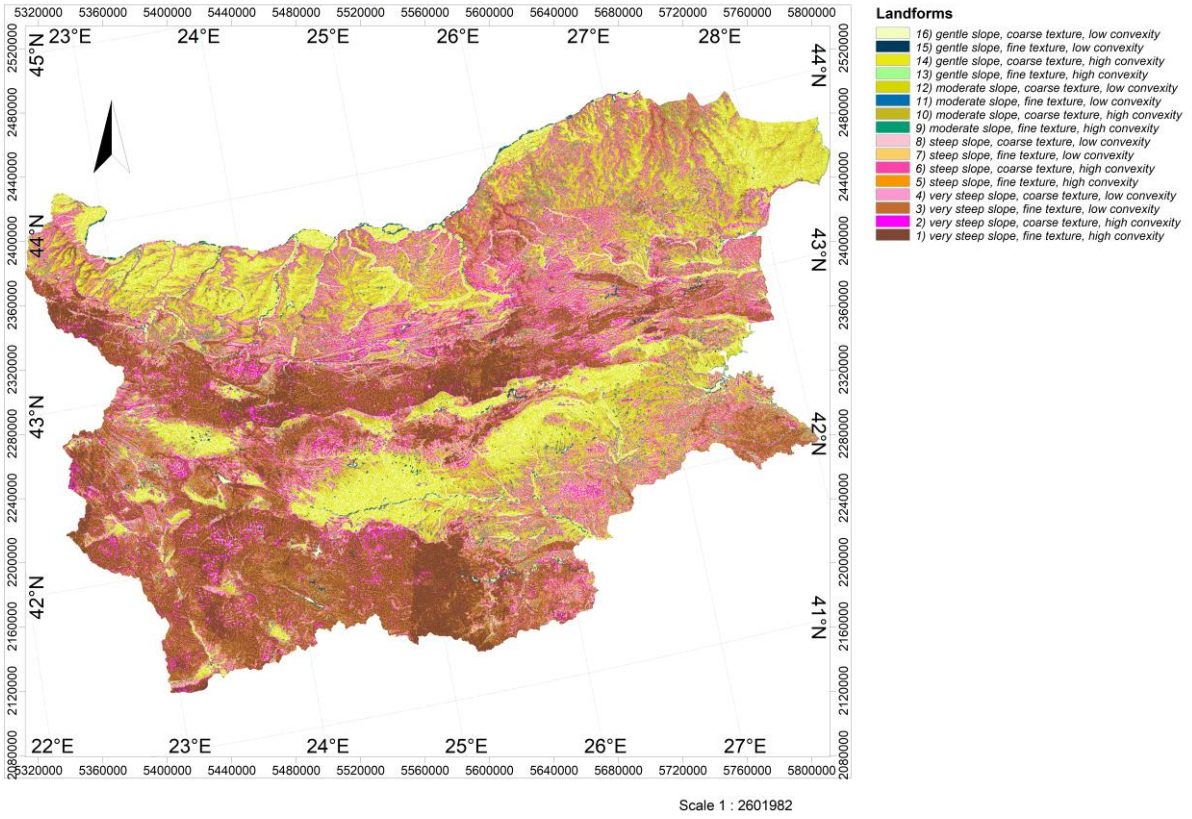


Fig. 2. Spatial distribution of terrain surface types within the study area

This study presents a morphometric classification of terrain types based on three key variables: slope gradient, surface texture, and surface convexity. A total of 16 distinct morphometric classes were identified and quantified. Each class was analysed in terms of its spatial extent, percentage of total coverage, and associated fractal dimension (D), a parameter reflecting surface complexity and geomorphological heterogeneity. The largest class by area is "very steep slope, fine texture, high convexity," covering 9,869.77 km², equivalent to 14.91% of the total area, with a high fractal dimension of 1.53. This suggests significant surface complexity, likely due to erosional and tectonic processes prevalent in such terrains. Similarly, classes with steep slopes and fine textures (e.g., Class 3 and Class 5) also demonstrate elevated D values (> 1.4), underscoring the influence of fine soil materials on terrain intricacy, particularly when combined with high slope gradients. Conversely, terrain types characterized by gentler slopes and fine textures exhibit substantially lower fractal dimensions. Notably, Class 13 ("gentle slope, fine texture, high convexity") has the lowest D value of 0.92, indicating a relatively smooth and homogeneous surface morphology. This is consistent with the expected reduced complexity in low-relief environments dominated by depositional processes or extensive weathering. Texture emerges as a key modifier of fractal dimension within similar slope and convexity categories. Coarse-textured classes generally show slightly lower D values than their fine-textured counterparts when slope and convexity are held constant. For instance, within the steep slope and high convexity group, fine-textured Class 5 has D = 1.44, while coarse-textured Class 6 shows a marginally higher D = 1.47, likely reflecting the roughness induced by larger grain sizes. Convexity also plays a substantial role, with high convexity conditions correlating with higher D values across most slope categories. This may reflect the increased micro-relief variation and drainage dissection associated with convex landforms. However, exceptions exist, indicating possible interactions between lithology, vegetation, and erosional regimes. In total, over 60% of the terrain falls within steep or very steep slope categories, which predominantly exhibit higher fractal dimensions (D>1.4), emphasizing the geomorphological dynamic nature of the landscape. Moderate and gentle slopes, although contributing a smaller proportion to the total area, provide important contrast through their generally lower D values and simpler surface geometry.

Geographically (Fig. 2), Terrain classes 1 through 4, characterized by very steep slopes with varying texture and convexity, are dominantly distributed across the high mountain systems—most notably in the Rila, Pirin, and western Rhodope Mountains. These classes collectively cover over 36% of the national territory, aligning with Bulgaria’s alpine zones where rugged topography and high

elevation gradients prevail. Classes 5 to 8, representing steep slopes, are widespread in transitional mountainous regions such as Sredna Gora, the Eastern Rhodopes, and the Fore-Balkan. These areas demonstrate intermediate relief energy and serve as morphological corridors between lowland basins and high mountains. With a combined area share of roughly 26%, they are pivotal in Bulgaria's orographic structure. Moderate slope classes (9 to 12) show a more dispersed distribution, frequently occurring in dissected hilly terrains and fluvial margins across the Danubian Plateau and western Upper Thracian Lowland. These zones exhibit a balance between structural control and erosional shaping, hosting both agricultural use and semi-natural landscapes. Gentle slope classes (13 to 16), indicative of flat to gently rolling relief, dominate the country's major lowlands—namely the Danubian Plain, the Upper Thracian Lowland, and portions of the Burgas and Dobrudzha coastal plains. These areas, comprising approximately 19% of the territory, are essential for intensive land use and infrastructure due to their minimal relief constraints.

In conclusion, the spatial distribution of relief classes in Bulgaria reflects a complex interplay of tectonic uplift, lithological resistance, and surface processes. The 16 Iwahashi–Pike classes not only map topographic diversity with quantitative precision but also correlate strongly with the country's established geomorphological regions. This framework enhances regional planning, landscape ecology, and natural hazard assessment across Bulgaria's varied terrain.

Conclusion

In the present study, using unsupervised nested-means algorithm, a classification of local terrain was made. Sixteen terrain classes were identified and extracted. The results obtained confirm that the terrain surface within the study area is variable. The analysis reveals a clear correlation between terrain slope, soil texture, and surface convexity with fractal dimension, serving as a proxy for geomorphological complexity. Steep and fine-textured terrains, especially under high convexity, tend to be the most complex, whereas gentle, fine-textured surfaces are the smoothest. These findings have significant implications for erosion modelling, land use planning, and landscape evolution studies. Such an approach provides broader opportunities for geomorphological research and offers new insights into contemporary geodynamics by integrating internal and external processes of terrain formation.

References:

1. Evans, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? Geomorphology, 137 (1), 2012, pp. 94–106. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.014
2. European Environment Agency (EEA). Copernicus EU-DEM v1.1 Metadata. 2019. Retrieved from https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/eu-dem-v1.1
3. Florinsky, I. V. Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology (2nd ed.). Academic Press, 2012
4. Hengl, T., & H. I. Reuter (Eds.). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, 2009
5. Iwahashi, J., & R. J. Pike. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology, 86 (3–4), 2007, pp. 409–440. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012
6. Jasiewicz, J., & T. F. Stepinski. Geomorphons—A pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. Geomorphology, 182, 2013, pp. 147–156. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005
7. Lam, N. S.-N., & L. De Cola. Fractals in Geography. Prentice Hall, 1993
8. Mandelbrot, B. B. The fractal geometry of nature. W.H. Freeman, 1983
9. Minár, J., & I. S. Evans. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. Geomorphology, 95 (3–4), 2008, pp. 236–259. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.029
10. Sánchez, N., F. Reinoso, & A. Crisci. Multiscale analysis of terrain roughness using fractal dimension and anisotropy measures. International Journal of Remote Sensing, 27 (12), 2006, pp. 2483–2502. https://doi.org/10.1080/01431160500500370
11. Wechsler, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review. Hydrology and Earth System Sciences, 11 (4), 2007, pp. 1481–1500. https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007
12. Wilson, J. P., & J. C. Gallant. Terrain Analysis: Principles and Applications. Wiley, 2000.

СЕЗОННО ИЗМЕНЕНИЕ НА ПРАХОВОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ В СОФИЯ ПО ДАННИ ОТ ЛЮБИТЕЛСКИ АИС

Мария Димитрова, Пламен Тренчев

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

Ключови думи: *атмосферно замърсяване, ФПЧ, PM1, PM2.5, PM10*

Резюме: *В работата е представено сезонното поведение на ФПЧ PM2.5 и PM10 за района на град София за периода 2020–2025 година. Изследването е направено по райони, като територията на града е разделена на 8 области. Полученото сезонно изменение има идентично поведение в отделните части на града и като пример е представено то в централната градска част. За сравнение са използвани и данните от официалните 5 АИС в града, както и тези от мобилната станция.*

SEASONAL CHANGE IN DUST POLLUTION IN SOFIA CITY ACCORDING TO AMATEUR AIS DATA

Maria Dimitrova, Plamen Trenchev

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

Keywords: *air pollution, PM1, PM2.5, PM10*

Abstract: *The work presents the seasonal behavior of PM2.5 and PM10 PM for the region of the city of Sofia for the period 2020–2025. The study was conducted by region, with the city's territory divided into 8 districts. The resulting seasonal change has identical behavior in the individual parts of the city and is presented as an example in the central city area. Data from the 5 official AIS in the city, as well as those from the mobile station, were also used for a comparison.*

Въведение

Финитe прахови частици (ФПЧ) са основният и най-масов замърсител на атмосферния въздух. Те са сериозен проблем за качеството на въздуха в град София и създават потенциален риск за здравето на експонираното на повишени нива на прах население. Самото наименование подсказва, че ФПЧ са съставени от твърди частици, малки водни капчици и допълнително адсорбирани на повърхността им други химически субстанции (органични съединения, метали, алергени под формата на фрагменти от полени, плесени, спори).

ФПЧ с размери между 10 и 2,5 микрона достигат до белите дробове. ФПЧ с размери под 2,5 микрона в диаметър, достигат до алвеолите, откъдето могат да попаднат в кръвообращението, а чрез него до всички органи и системи в организма.

Официалните данни за качеството на атмосферния въздух в България се дават от Националната автоматизирана система за контрол качеството на въздуха се състои от 50 стационарни пункта, вкл. 34 автоматични измервателни станции (АИС), 9 пункта с ръчно пробонабиране и последващ лабораторен анализ и 7 автоматични ДОАС системи.

Пунктовете за контрол качеството на атмосферния въздух (КАВ) са разположени в 34 населени места. Данните постъпват в реално време в Националната база данни и са предварителни. След проверка за достоверност и верифицирането им, окончателните данни се публикуват в тримесечните бюлетини, издавани от ИАОС.

Информацията за състоянието на атмосферния въздух от всички пунктове за мониторинг постъпва в централен диспечерски пункт в ИАОС.

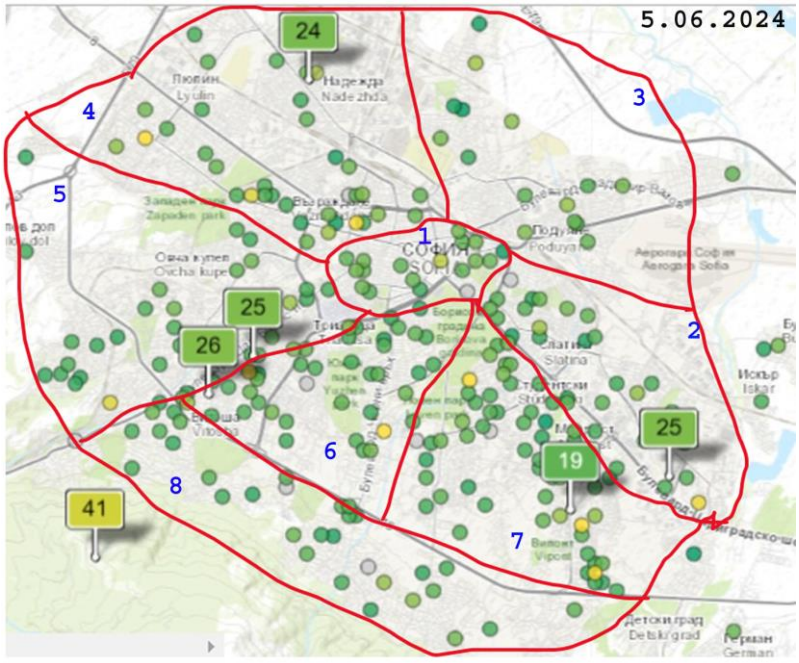
На локално ниво информацията постъпва в регионални диспечерски пунктове, разположени в съответните РИОСВ [1, 2].

На територията на град София са разположени множество любителски сензори за мониторинг на ФПЧ PM2.5 и PM10, а в последно време и такива за измерване на PM1.

Цел на настоящата работа е да бъде изследвано сезонното изменение на праховото замърсяване на град София по наземни данни от любителски, както и да бъдат сравнени резултатите, с тези, получени от официалните източници.

Използвани данни и методи на обработка

За получаване на сезонния ход на разпространение на фини прахови частици PM2.5 и PM10, основният източник на данни, който е изграден изцяло от евтини любителски сензори с много добро покритие в големите градове на Европа е Senzor.Comuniti [3, 4]. Той представлява управлявана от сътрудници глобална сензорна мрежа, която създава отворени данни за околната среда. “Неговата мисия е да вдъхновяваме и обогатяваме живота на хората, като предлагаме платформа за колективното любопитство в природата, което е истинско, радостно и позитивно” [3]. На територията на гр. София са разположени 289 наземни датчика за фини прахови частици PM2.5 и PM10 от типа Senzor.Comuniti чието разположение е показано на фиг. 1 [5].



Фиг. 1. Разположение на любителските станции за ФПЧ в гр. София

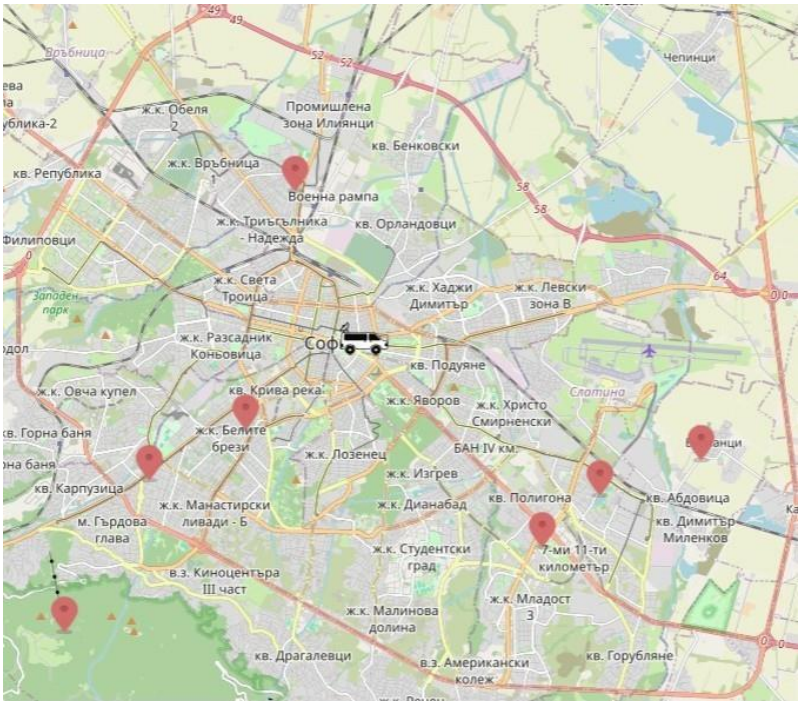
Територията на гр. София условно е разделена на 8 области, както е показано на фиг. 1.

За всяка една област са събрани данните от намиращите се в нея датчици. Данните от всеки датчик са филтрирани и усреднени за целия период, който за преобладаващото число е от януари 2020 до края на август 2025 г.

На територията на град София има действащи няколко официални АИС и една мобилна станция, която в повечето време е паркирана в центъра на града на постоянно място. На фиг. 2 е представено разположението на тези станции [6, 7].

Усредняването се прави основно за да се получи един по-достоверен сезонен на кривата. От друга страна, т.к. се използват данни от любителски станции, които понякога имат много липсващи данни за даден месец, усреднената стойност по години е по-достоверна.

Данни от мобилната станция на Столична община са използвани само за периодите, когато последната се е намирала на паркинга зад сградата на общината на адрес ул. Париж 5. В данните от нея също има съществени периоди без данни, което отново оправдава усредняването освен по месеци и по години.



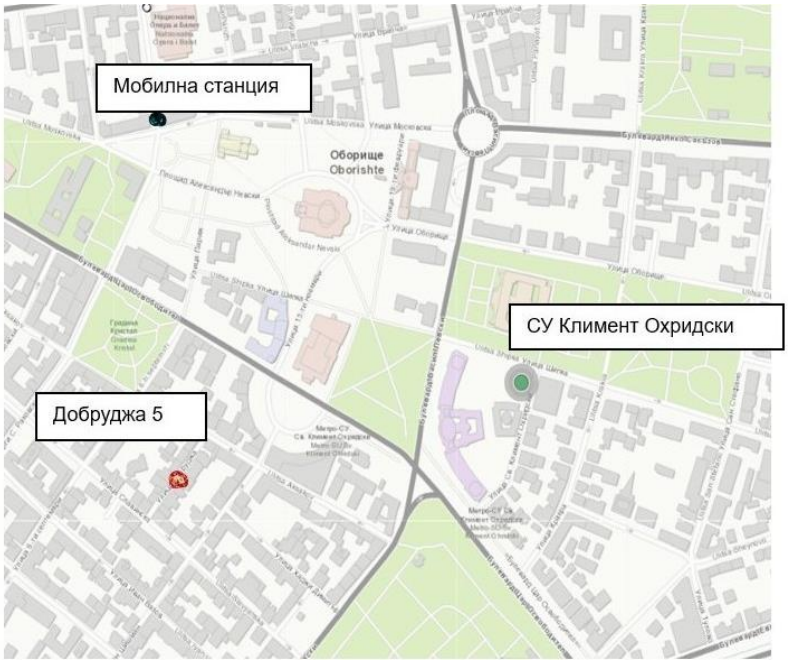
Фиг. 2. Разположение на официалните АИС в гр. София и мобилната станция на Софийска община

От началото на 2024 година на територията на град София по проект с ФНИ [8, 9] са разположени и въведени в експлоатация три датчика от тип IQAir [10], които дават данни освен за PM2.5 и 10, още и за PM1.

За целите на настоящата работа основно внимание е обърнато на централния градски район, за който са използвани 11 любителски станции от типа [3], чиито данни покриват целия разглеждан период. 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.

За сравнение са построени същите графики по данни от мобилната станция на Столична община за периода от декември 2021 до средата на юли 2025 година. След тази дата няма данни от мобилната станция.

Като допълнение е получена и сезонното поведение на PM1 по данни от станцията на IQAir, която се намира на ул. Добруджа 5, но само за периода март 2024 – август 2025 г.



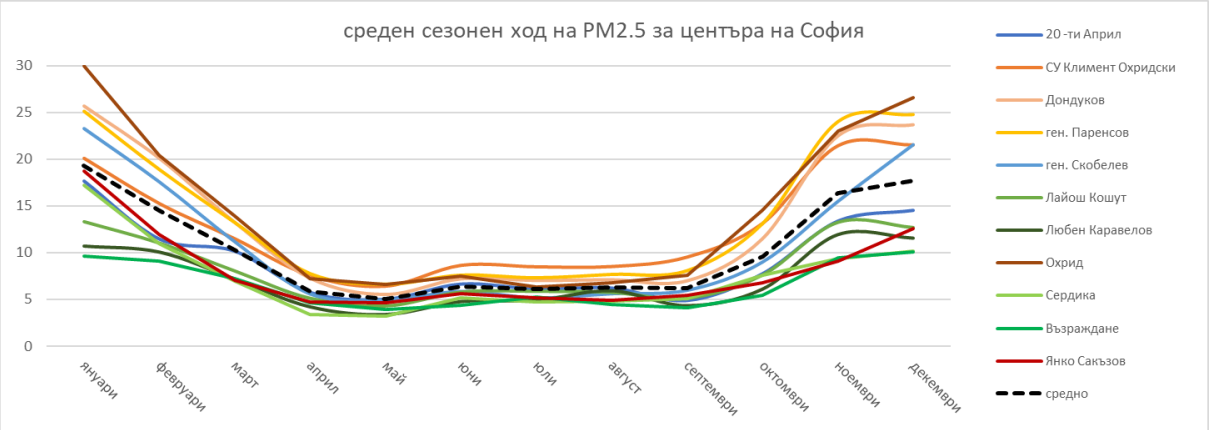
Фиг. 3. Разположение на измервателните станции

Направени са подобни сезонни графики и за някои станции от тип [3] в други райони на столицата.

Сравнени са резултатите от мобилната станция с тези от станция СУ Климент Охридски и тези за PM1. Станция СУ е избрана като отстояща на най-малко разстояние едновременно от мобилната станция и от станцията от тип IQAir на ул. Добруджа 5. Разположението на трите станции е представено на фиг. 3

Резултати

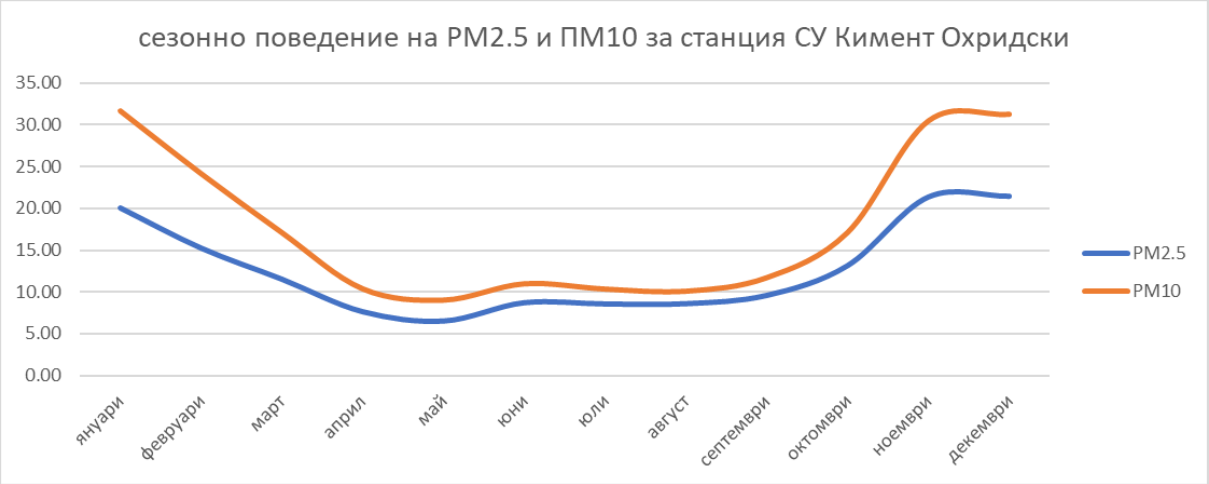
На фиг. 4 е представено усредненото сезонното изменение на ФПЧ в централната част на град София.



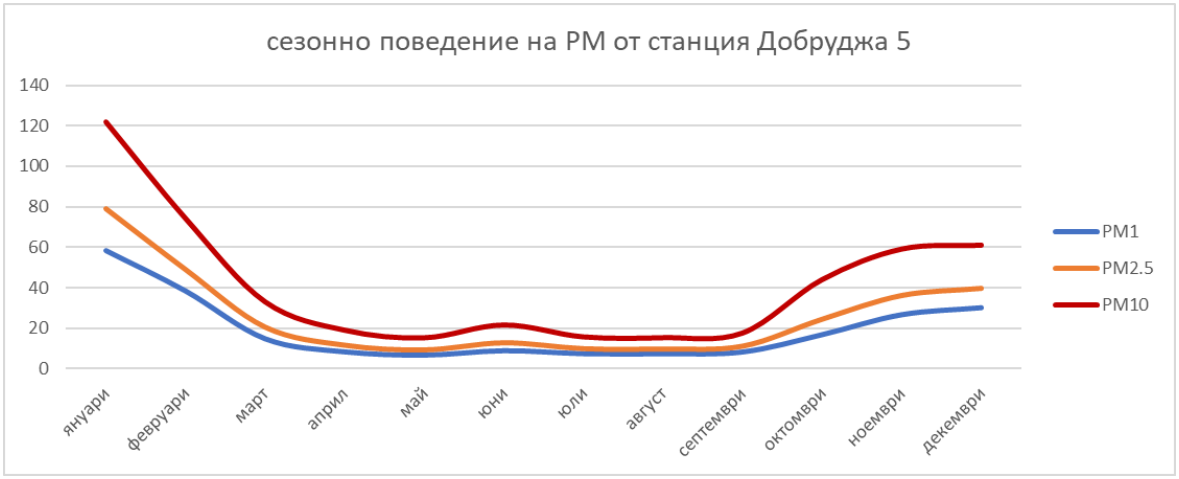
Фиг. 4. Средно сезонно изменение на PM2.5 за централната част на град София

Подобна средна сезонна крива е построена за същите станции за PM10. Доколкото в настоящата работа се интересуваме от сезонния ход, но не и от конкретните стойности, графиката не е показана. Кривите са аналогични на тези от фиг. 4, но с по-високи стойности.

На фиг. 5 и фиг. 6 са представени сезонните поведения на PM2.5 и PM10 за станции СУ Климент Охридски и сезонното поведение на PM1, PM2.5 и PM10 от станция Добруджа 5.

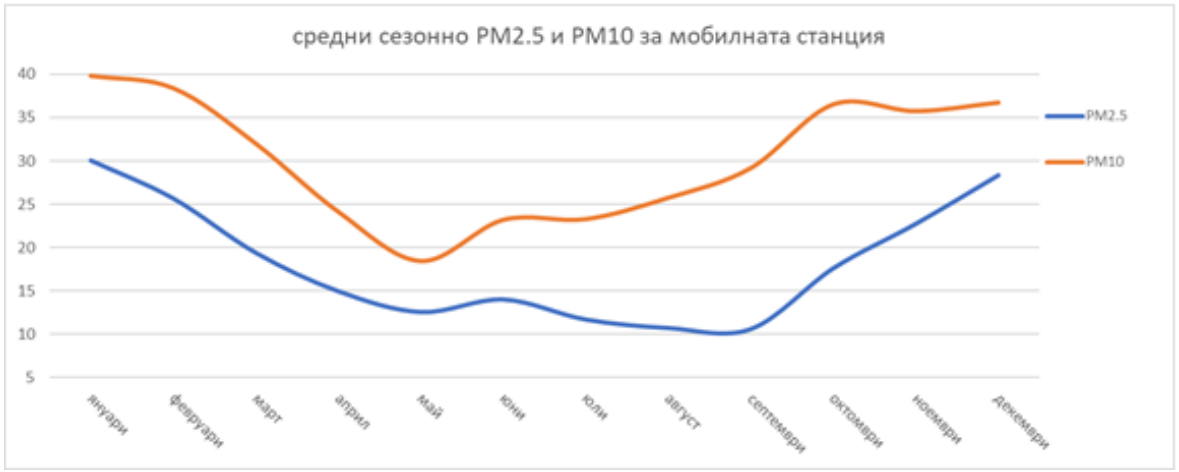


Фиг. 5. Сезонно изменение на PM2.5 и PM10 от станция СУ Климент Охридски



Фиг. 6. Сезонно изменение на PM от станция Добруджа 5

При сравняване на стойностите за ФПЧ от различен тип станции, освен типа регистриращ датчик, следва да се вземе под внимание и това какъв вид данни предоставя съответния източник. В случая с разглежданите тук станции от тип [3], предоставят се за данни за медианата, но не и за среднодневна стойност.



Фиг. 7. Сезонно изменение на PM2.5 и PM10 от мобилната станция на Софийска община

На фиг. 7 е показано за сравнение сезонното поведение PM2.5 и PM10 от мобилната станция на Столична община.

Както се вижда от трите фигури, сезонният ход на PM2.5 и PM10 е аналогичен. Подобен е и ходът на кривите от трите станции.

Анализ на резултатите

От сравнението на фиг. 4, фиг. 5 и фиг. 6 може да се направи изводът, че използваните два различни типа любителски автоматични измервателни станции за фини прахови частици показват подобни сезонни криви както за PM2.5 и PM10, така и за PM1.

Наблюдават се очакваните максимуми на запрашаване в началните месеци на годината както и през ноември и декември. Наблюдава се и леко покачване през месец юни.

Кривите от мобилната станция на Столична община, макар и с подобен характер, не са толкова гладки.

Максималните усреднени стойности през зимните месеци от всички показани измервателни станции са твърде високи и близки или сравними с пределно допустимите.

За момента няма официално определени пределно допустими стойности за PM1, няма и официални измервания за нивото му. А измерването на най-дребните ФПЧ е особено важно, т.к. те проникват много по-дълбоко в организма, в кръвоносната система и предизвикват здравословни поражения.

Заключение

В заключение можем да отбележим, че следенето на нивата на ФПЧ, а именно PM1, PM2.5 и PM10 посредством любителски станции дава една много по-богата база за сравнение и по-нататъшни изследвания.

Литература:

1. Столична община – Качество на атмосферния въздух – https://airmon.sofia.bg/
2. КАВ – https://www.eea.government.bg/kav/
3. Citizen Science project sensor.community – https://sensor.community/en/
4. Данни за ФПЧ над България - https://aqicn.org/map/bulgaria/
5. Мария Димитрова. Анализ на пространственото разпределение на праховото замърсяване над София по данни от АИС. Proceedings SES 2024, 2024, ISSN:2603-3313, 263–267
6. Мария Димитрова. Типове АИС за фини прахови частици в България – сравнителни характеристики, брой и разположение. Proceedings SES 2024, 2024, ISSN:2603-3313, 253–263
7. Столична община, качество на атмосферния въздух – https://air2.sofia.bg/airpublic/air/data/forecasts/measures/list/
8. Filchev, L., Dimitrova, M., Trenchev, P., Jelev, G., Chanev, M., Cahyadi, M.. Preliminary Results from Smart Integrated Devices for Telemedicine to Combat COVID-19 Toward New Resilience City – Smart4COV19/Telemedicine Project. Proceedings of 3rd National Workshop with international participation under the EU Copernicus programme, Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS), 2023, ISBN:978-619-7490-16-9, DOI:https://doi.org/10.5281/zenodo.10439070, 56–63
9. Filchev, L., Dimitrova, M., Trenchev, P., Chanev, M., Jelev, G.. From Space to Health: The Impact of Earth Observation Research on the Smart4COV19 Telemedicine project. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1418, IOP Publishing, 2024, ISSN:I1755-1315, DOI:doi:10.1088/1755-1315/1418/1/012049, 012049. SJR (Scopus):0.19
10. IQAir – https://www.iqair.com/

ВРЪЗКА НА СЕЗОННО ИЗМЕНЕНИЕ НА НЯКОИ АТМОСФЕРНИ ЗАМЪРСИТЕЛИ СЪС СЕЗОННАТА ЗАБОЛЕВАЕМОСТ ОТ РЕСПИРАТОРНИ БОЛЕСТИ

Мария Димитрова, Пламен Тренчев, Лъчезар Филчев, Георги Желев, Милен Чанев

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

Ключови думи: *ОРЗ, COVID-19, атмосферни замърсявания*

Резюме: *В работата е направен опит да се проследи корелацията на сезонното изменение на замърсяването с ФПЧ NO_2 и други атмосферни замърсители в големите градове на България със сезонното изменение на заболеваемостта от респираторни болести. Използвани са спътникови и наземни данни за атмосферните замърсители и данни от Министерството на здравеопазването и Националния център по заразни и паразитни болести.*

RELATIONSHIP OF SEASONAL CHANGES IN SOME ATMOSPHERIC POLLUTANTS WITH SEASONAL INCIDENCE OF RESPIRATORY DISEASES

Maria Dimitrova, Plamen Trenchev, Lachezar Filchev, Georgi Jelev, Milen Chanev

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

Keywords: *acute respiratory diseases, COVID-19, atmospheric pollution*

Abstract: *The work attempts to trace the correlation of seasonal changes in PM2.5, PM10, NO_2 and other atmospheric pollutants in large cities of Bulgaria with seasonal changes in respiratory disease incidence. Satellite and ground-based data of atmospheric pollutants and data from the Ministry of Health and the National Center for Infectious and Parasitic Diseases were used.*

Въведение

Настоящето изследване е извършено в рамките на проект Smart4COV19 Telemedicine [1, 2] имащ за цел да бъде изследвано влиянието на атмосферните замърсители върху разпространението на болестта. Влиянието на атмосферните замърсители в мащаб община на базата на спътникови данни е публикувано в [3].

Доколкото COVID-19 както всяко подобно респираторно заболяване има сезонен характер, важно е влиянието на атмосферните замърсители да бъде изследвано и в тази светлина.

Данни за разпространението на COVID-19 от един източник има само от средата на 2020-та до средата на 2024-та година. При това, като ново заболяване, предизвикало пандемия, тенденциите като сезонност и устойчивост във времето е рано да бъдат очертавани. По тази причина, в настоящата работа са изследвани тенденциите основно на острите респираторни заболявания и грип – ОРЗ. Сезонните тенденции за COVID-19, показани тук имат по-скоро илюстративен характер.

Използването на спътникови данни за атмосферните замърсители има някои съществени ограничения. На първо място, данните представляват концентрацията на съответния замърсител в цялата колона над определения район. Особено при изследване влиянието им върху дихателната система на човека, много по-важна е концентрацията в приземния слой.

На второ място, спътниковите данни дават твърде неточно измерване за финитe прахови частици, които са и един от основните елементи, засягащи дихателната система.

В тази връзка, по-надеждни са данните от Автоматичните измервателни станции – АИС. Такива станции, обаче в България има твърде малко, като те са разположени основно в големите населени места.

Основните замърсители, които се отчитат над територията на България по спътникови данни са азотния диоксид – NO_2 и финитe прахови частици. Останалите измервани замърсители като серен диоксид – SO_2, въглероден оксид CO и други показват сравнително ниски и сравнително равномерно разпределени стойности.

В настоящата работа е разгледани финитe прахови частици като абсорбционен аерозолен индекс по спътникови данни и PM2.5, PM10 по наземни, както и азотния диоксид.

Използвани данни и методи

За получаване на сезонния ход на разпространение на ОРЗ са използвани данни от два източника – Данни от информационната система към центъра за заразни и паразитни болести и данни за епидемичната обстановка от Министерството на здравеопазването.

Информационна система за събиране и анализиране на данни за заболяемостта от грип и ОРЗ в България към Центъра за заразни и паразитни данни [4] Системата е разработена в рамките на проект 07/0254/CO-BUL "Подобряване на реагирането при поява на птичи грип в България" на Американската агенция за международно развитие (USAID), с помощта на Световната здравна организация (СЗО), регионален офис за Европа и Министерство на здравеопазването (МЗ).

Информационната система представлява Интернет базиран инструмент за провеждане на сентинелен надзор на грип и остри респираторни заболявания (ОРЗ) в България. Тя е предназначена за събиране и анализ на данните за заболяемостта в областните градове на страната и за разпространяване на обобщената информация до всички нива и институции, отговорни за предприемането на профилактични и противоепидемични мерки при възникване на грипни епидемии. Като използва седмичната информация за заболяемостта от грип и ОРЗ за предходните години, системата определя на основата на персентилите нивата на интензивност на епидемичния процес.

Данните са на седмична база, като такива се съхраняват за всяка една седмица от 1.11.2007 г. до момента. Данните са извлечени от представителна извадка от населението и се дават като брой заболели и брой заболели на 10 000 души [4].

Данните за епидемичната обстановка от Министерството на здравеопазването [5] същите данни, заедно с данни за други видове заболявания се предоставят от края на януари 2009 г.

В настоящата работа са извлечени данните за ОРЗ на база 10 000 души и са представени графично по години и като средна стойност за съответната седмица. За сравнение е направена графика и на средната заболеваемост от ОРЗ по години.

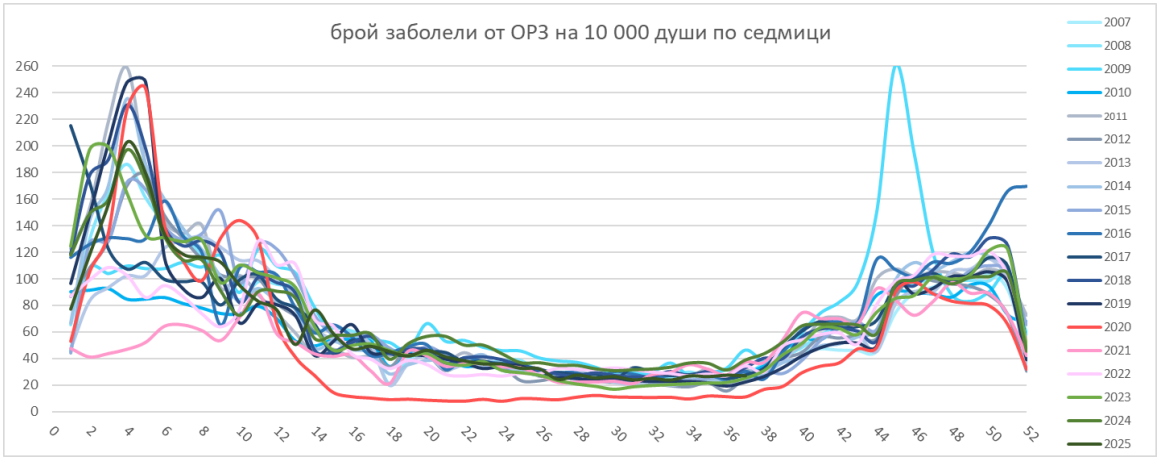
За сравнение е направена и графика на сезонното разпределение на COVID-19 за периода от 6.06.2020 до 1.07.2024 г. по данни от Портал за отворени данни, предоставящ достъп до публични данни в Република България в отворен и машинночетим формат [6], а за периода след това – от данните за епидемичната обстановка от МЗ.

Използвани са данните за атмосферни замърсявания от TEMIS – Tropospheric Emission Monitoring Internet Service на ESA [7], на месечна база, като в повечето случаи са взети и допълнени резултати от предишни разработки на авторите.

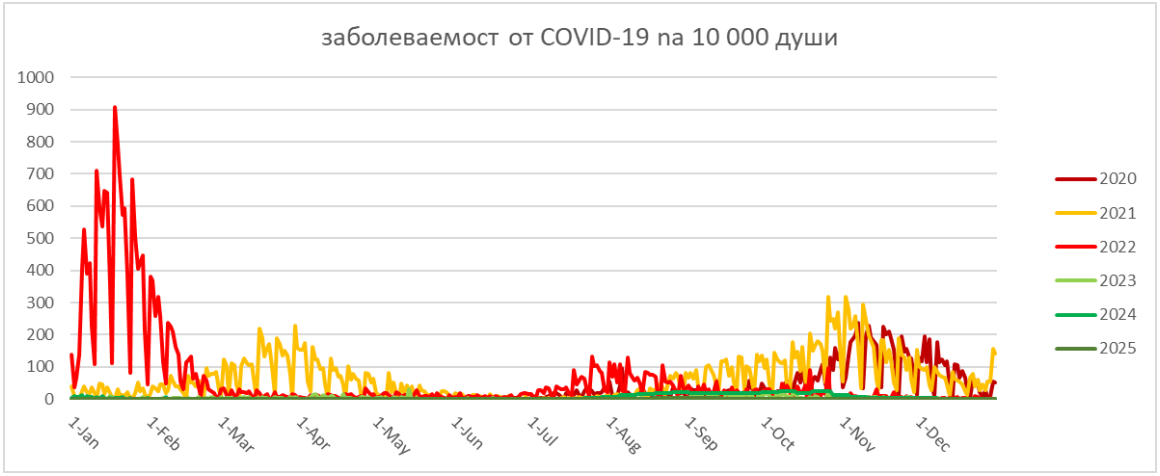
Наземни данни за някои атмосферни замърсители в някои от големите градове са взети от Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух [8]. Използвани са данни на дневна база, които са усреднени за периода 2020-та – 2025-та г. За София и Пловдив са усреднени и данните от различните АИС.

Резултати

На фиг. 1 е представено сезонното изменение на заболеваемостта от ОРЗ по седмици по данни от Информационна система за събиране и анализиране на данни за заболяемостта [4] за периода от началото на 2007 г. до септември 2025 г. На фиг. 2 е представено сезонното изменение на заболеваемостта от COVID-18 за периода 07.06.2020 г. до 01.07.2024 г. по данни от Портал за отворени данни [6] и от 01.07.2024 г. до септември 2025 г. по данни от Министерсвото на здравеопазването [5].



Фиг. 1. Сезонно изменение на заболеваемостта от ОРЗ в България



Фиг. 2. Сезонно изменение на заболеваемостта от COVID-19 в България

Както се вижда от двете фигури, макар и за много кратък период, заболеваемостта от COVID-19 показва типичния за България сезонен характер на ОРЗ.

За по-добро онагледяване, на фиг. 3 и фиг. 4 са показани съответно усреднените стойности на заболеваемостта от ОРЗ и COVID-19 по седмици.

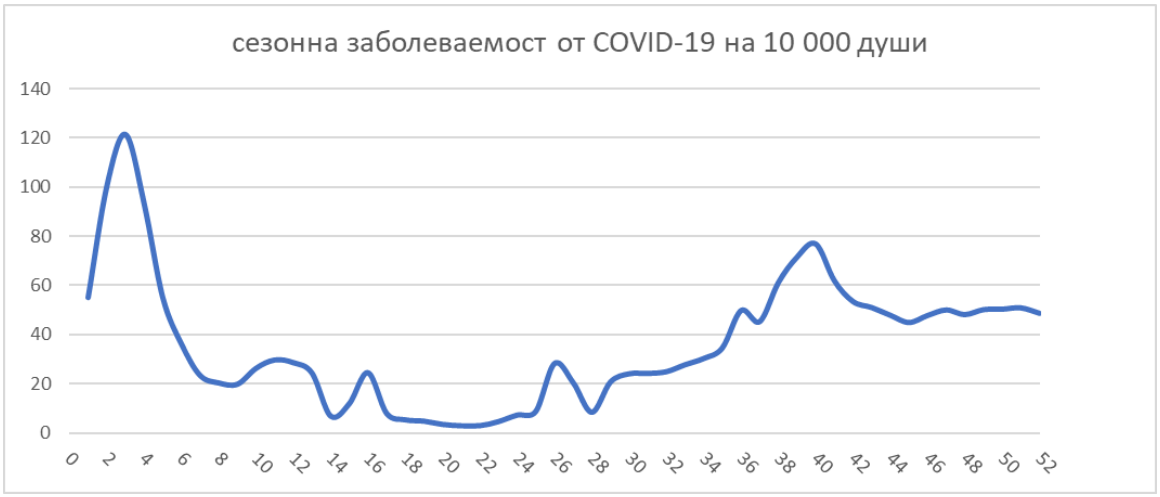
Доколкото използваните данни за COVID-19 за основния период са на дневна база, както се и представени на фиг. 2, за по-добро сравнение на фиг. 4 те са усреднени по седмици.

На фиг. 5 е представено типично сезонно изменение на основните атмосферни замърсители PM10 и NO_2 за град София по усреднени данни от петте АИС [8]. Данните за PM2.5 са от АИС Хиподрума.

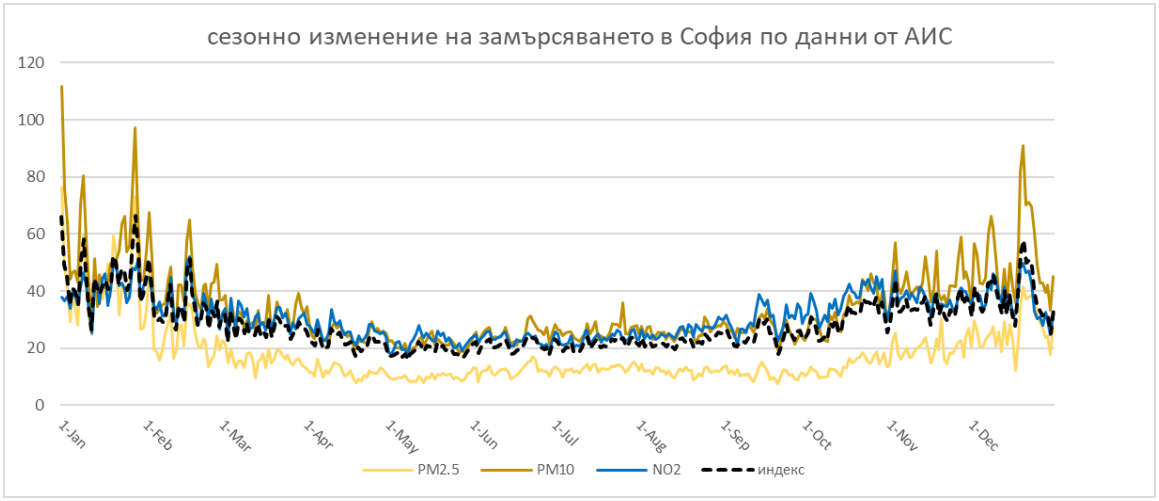
За сравнимост на данните с изследванията на пространствената зависимост [3] е въведен и представен индекс на замърсяване P (пунктираната черна линия) както следва

(1) $P = ((PM2.5 + PM10)/2 + NO_2)/2$

Фиг. 3. Средно сезонно изменение на заболеваемостта от ОРЗ в България



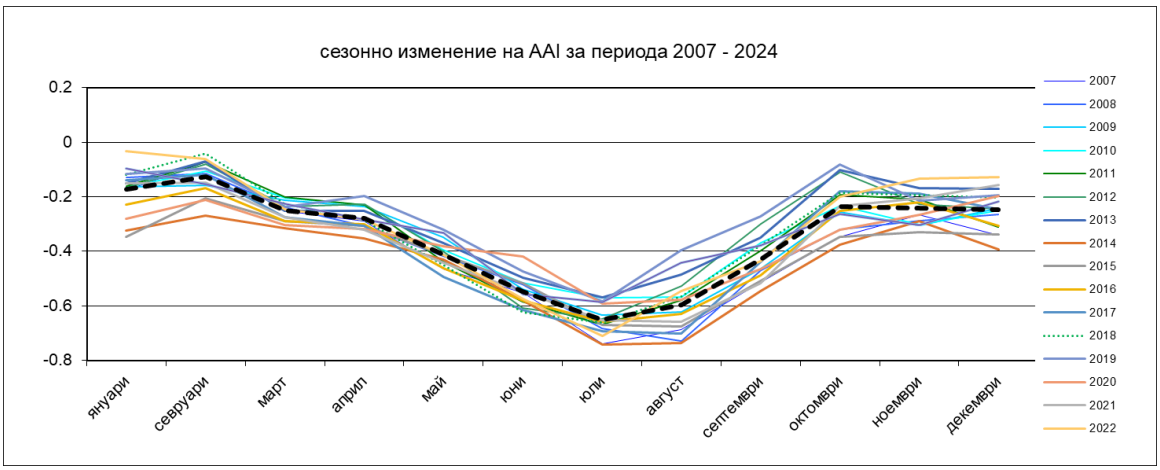
Фиг. 4. Средно сезонно изменение на заболеваемостта от COVID-19 в България



Фиг. 5. Сезонно изменение на PM2.5, PM10 и NO_2 за град София

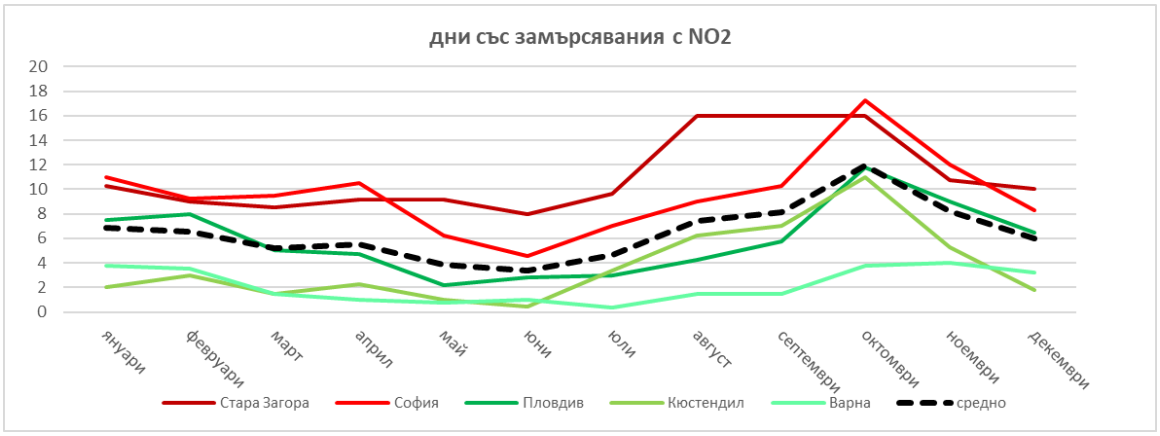
Аналогично е сезонното поведението на атмосферните замърсители в Пловдив, Варна и Перник. Доколкото настоящата работа има за цел да сравни сезонното поведение на заболеваемостта с това на атмосферните замърсители, но не и да се търси някаква числова зависимост, представена е само графиката за град София като място с няколко АИС и най-голяма плътност на населението.

На следващите фиг. 6 и фиг. 7 е представено сезонното поведение на AAI и NO_2 по спътникови данни.



Фиг. 6. Сезонно изменение на AAI по данни от MetOp A, B и C

За графиката от фиг. 6 са използвани и допълнени данните от наши предишни изследвания [9].



Фиг. 7. Брой дни с наблюдавано засилени емисии NO2 по данни от Tropomi [7]

За графиката са използвани и допълнени данните от [10].

Само за илюстрация на фиг. 8 е представена усреднената заболеваемост от ОРЗ в България по години.

Фиг. 8. Средна заболеваемост от ОРЗ на 10 000 души по години

Както се вижда от фигурата, средната заболеваемост от ОРЗ в България е сравнително постоянна в годините. Наблюдава се единствено известен спад през периода 2021–2022 г., когато е и максималната заболеваемост от COVID-19.

Анализ на резултатите

От сравнението на фиг. 3, фиг. 4 и фиг. 5 се вижда, че както заболеваемостта от ОРЗ за периода 2007–2025 г., така и тази от COVID-19 за периода средата на 2020-та г. до септември 2025-та г. показва аналогичен характер с кривата на сезонното изменение на индекса на замърсяване. Ясно се очертава два максимума – основен в първите два месеца на годината и втори, по-плавен и продължителен в есенните месеци.

Подобният характер и познанието за характера на ОРЗ определено дават основание да се приеме, че атмосферните замърсявания с фини прахови частици и азотен диоксид в големите градове оказват влияние върху разпространението на ОРЗ и, в частност, на COVID-19.

Сателитните данните показват подобен характер за есенните месеци, но не толкова изразен максимум в началото на годината.

Заключение

В заключение можем да отбележим че разглеждането на атмосферните замърсители като фактор за засилване на заболеваемостта от ОРЗ има своите основания.

В бъдеще следва да се изучи по-подробно влиянието на различните типове ФПЧ, а именно PM1, PM2.5 и PM10.

Благодарности:

Изследването е извършено в рамките на проект „Smart Integrated Devices for Telemedicineto Combat COVID-19 Toward New Resilience City“ (Smart4COV19/ Telemedicine), договор КП-06-Д002/8/2021 между ИКИТ-БАН и Фонд „Научни изследвания“ към Министерството на образованието и науката по програма SEA-EUROPE JFS.

Литература:

1. Filchev, L., Dimitrova, M., Trenchev, P., Jelev, G., Chanev, M., & Cahyadi, M. (2023). Preliminary Results from Smart Integrated Devices for Telemedicine to Combat COVID-19 Toward New Resilience City – Smart4COV19/Telemedicine Project. Proceedings of 3rd National Workshop with International Participation Under the EU Copernicus Programme, 56–63. https://doi.org/10.5281/zenodo.10439070
2. Filchev, L., Dimitrova, M., Trenchev, P., Chanev, M., Jelev, G.. From Space to Health: The Impact of Earth Observation Research on the Smart4COV19 Telemedicine project. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1418, IOP Publishing, 2024, ISSN:I1755-1315, DOI:doi:10.1088/1755-1315/1418/1/012049, 012049. SJR (Scopus):0.19
3. Lachezar Filchev, Maria Dimitrova, Plamen Trenchev, Georgi Jelev, Milen Chanev. The impact of air pollution on the spatial distribution of Covid-19 across Bulgaria: a study using satellite and in situ data. Proc. SPIE 13816, Eleventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2025), 2025, ISBN:978151069531, ISSN:1996-756X, DOI:https://doi.org/10.1117/12.3073135, SJR (Scopus):0.17
4. Информационна система за събиране и анализиране на данни за заболяемостта от грип и ОРЗ в България – Национален център по заразни и паразитни болести – https://grippe.gateway.bg/
5. Министерство за здравеопазването – Епидемична обстановка – https://www.mh.government.bg/bg/novini/epidemichna-obstanovka
6. Портал за отворени данни, предоставящ достъп до публични данни в Република България в отворен и машинночетим формат – https://data.egov.bg/data/resourceView/cb5d7df0-3066-4d7a-b4a1-ac26525e0f0c/1329
7. TEMIS – Tropospheric Emission Monitoring Internet Service – https://www.temis.nl/
8. Система за информиране на населението за качеството на атмосферния въздух. https://www.eea.government.bg/kav/
9. Maria Dimitrova, Pregyova Y.. USING AAI FORM GOME 2 INSTRUMENT, ONBOARD METOP A, B AND C SATELLITES FOR INVERSTIGATION OF DUST POLLUTION OVER BULGARIA. Aerospace Research in Bulgaria, 37, 2025, ISSN:1313-0927, DOI:https://doi.org/10.3897/arb.v37.e05, 51–59
10. Dimitrova, M., Trenchev, P., Gochev, D.. Spatial and Seasonal Distribution of NO_2 Pollution over Bulgaria, Based on TROPOMI Measurements. Proceedings SES 2020, Space Research Technology Institute – BAS, 2020, ISSN:2603-3313, 279–282.

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

SENSORS FOR THE NATIONAL NEURAL NETWORK FOR PROTECTION OF BUILDINGS AND FACILITIES FROM SEISMIC AND WIND LOADINGS

Stanimir Karapetkov[1], Philip Philipoff[2]*, Emad Abdulahad[3*], Kamen Ishtev[1], Diana Bankova[1], Plamen Manev[6*], Elka Radeva[7], Venelin Kondov[8*], Petia Minkova[9], Daniela Arnaudova[10], Simeon Panev[1], Ivan Demerdzhiev[12], Blagovest Panev[13], Ilian Dinev[14], Galina Maslarska[15*], Mehmet Salih Bayraktutan[16], Venkatanathan Natarajan[17], Mario Muñoz Organero[18], Dimo Dimov[19]

Technical University – Sofia, Universidad Carlos III de Madrid, Spain
University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy-Sofia,
Bulgarian Academy of Sciences, Ruse University "Angel Kunchev", GPS Control EAD
e-mail: philip.philipoff.decable.dregan@gmail.com, georgosing@gmail.com, pmanev@uni-ruse.bg, venelinkondov@gmail.com, office@tls.bg

Key words: *Signal Processing in L_2; Seismic wind and fire protection; Elevator devices; Computers and Sensors; Elevator Shafts; Contemporary Seismic Micro zoning; National Neural Networks.*

Abstract: *The sensors (3D accelerometers) of the described network forms a specific subsystem. This is a continuously functioning subsystem that performs constant monitoring of the dynamic behavior of buildings and facilities. The monitoring in modern earthquake engineering provides richer information in real time for all buildings and facilities in the aggregate of the data obtained from possible seismic micro zoning. The monitoring offered by using the sensor subsystem allows to immediately determine the dynamic characteristics of all buildings in the National Neural Network (several millions elevator devices). If the conditions of Theorem 8 of the study are met, this allows to guarantee the indestructibility of the neural network nodes even in the case of buildings with pre-defined defects.*

The First part of the research describes Automatic systems for active control oond direction is related f the structural dynamical response. This variant of the study represents a Neural Network consisting of a huge amount of automatically controlled systems. They are built over the existing elevator devices of seismically-vulnerable (from 3 to 16 floors) and wind-vulnerable (over 16 floors) buildings and facilities in seismic areas. Building infrastructure is controlled by the existing elevator shafts of the buildings. Contemporary subsystem of the proposed Neural Network (Seismic Micro zoning) over the dynamical sensors is created. This subsystem allows to organized continuous 24/7 monitoring of the dynamical response of Neural Network. The network is designed for existing buildings in their operational period. Moreover, if the conditions of proofed in the study theorems are met, this allows to guarantee the indestructibility of the neural network nodes (building structures) even in the case of buildings with pre-defined defects.

The Second part of the research represent Automatic systems with passive control. This variant of the development is an aluminum skeletal structure of a building on a neoprene insulation layer fixed on a common reinforced concrete slab of the building. All walls are of massive pneumatic construction, which consists of a thin rubberized structure filled with compressed air. This system provides fire protection.

СЕНЗОРИ ЗА НАЦИОНАЛНАТА НЕВРОНА МРЕЖА ЗА ЗАЩИТА НА СГРАДИ И СЪОРЪЖЕНИЯ СРЕЩУ СЕИЗМИЧНИ И ВЕТРОВИ НАТОВРВАНИЯ

Станимир Карапетков, Филип Филипов, Емад Абдулахад, Камен Ищев, Диана Банкова, Пламен Манев, Елка Радева, Венелин Кондов, Петя Минкова, Даниела Арнаудова, Симеон Панев,Иван Денерджиев, Благовест Панев, Илиян Динев, Галина Масларска, Мехмед Салих Байрактутан, Венханатан Натаражан, Марио Мунъос Органеро, Димо Димов

Технически Университет – София, Университет Carlos III de Madrid, Spain,
Унижерситет по Архитектура, Строителство и Геодезия-София,
Българска Академия на Науките, Русенски Университет „Ангел Кънчев', GPS Control EAD
e-mail: philip.philipoff.decable.dregan@gmail.com, georgosing@gmail.com, pmanev@uni-ruse.bg, venelinkondov@gmail.com, office@tls.bg

Ключови думи: *Обработка на сигнали в L_2; Сеизмична, ветрова и огнезащита; Елеваторни съоръжения, Компютри и сензори, Елеваторни шахти, съвременно сеизмично райониране, Сензори за Невронни Мрежи.*

Резюме. *В статията са преставени различните видове сензори, които могат да се използват в разработката* ***FREQUENCY L2 ANALYSIS OF THE NATIONAL NEURAL NETWORK FOR PROTECTION OF BUILDINGS AND FACILITIES FROM SEISMIC AND WIND LOADINGS.*** *В активната версия на изследването, сеизмично уязвими (от 3 до 16 етажа) и ветрови (над 16 етажа) сгради с функциониращи асансьори са обединени в невронна мрежа. Основните обекти – СЕНЗОРИ и ИНЕРИЦИАЛНИ ДВИГАТЕЛИ на активните системи за управление, са разположени в асансьорните шахти на сградата (поне четири копланарни двигателя в горната част на ВСЯКА асансьорна шахта на предложената невронна мрежа, съгласно Фигура 5). Съответно на предварително изготвен инженерен проект за асансьори за ВСЯКА СГРАДА, 3D акселерометри са поставени във основите на асансьорните шахти и в горната част на асансьорните шахти. Инерционните двигатели са поставени в горната част на асансьорната шахта и на допълнителни места върху покривната конструкция (ако е необходимо по изчисления). Акселерометрите и двигателите са елементи на невронната мрежа и за всяка асансьорна шахта те образуват ВЪЗЕЛ на мрежата (съгласно предварителните условия на Теорема 8 от изследването).*

Introduction

Seismic NPP-s micro-zoning and NPP Soil-Structure Interaction Sensors

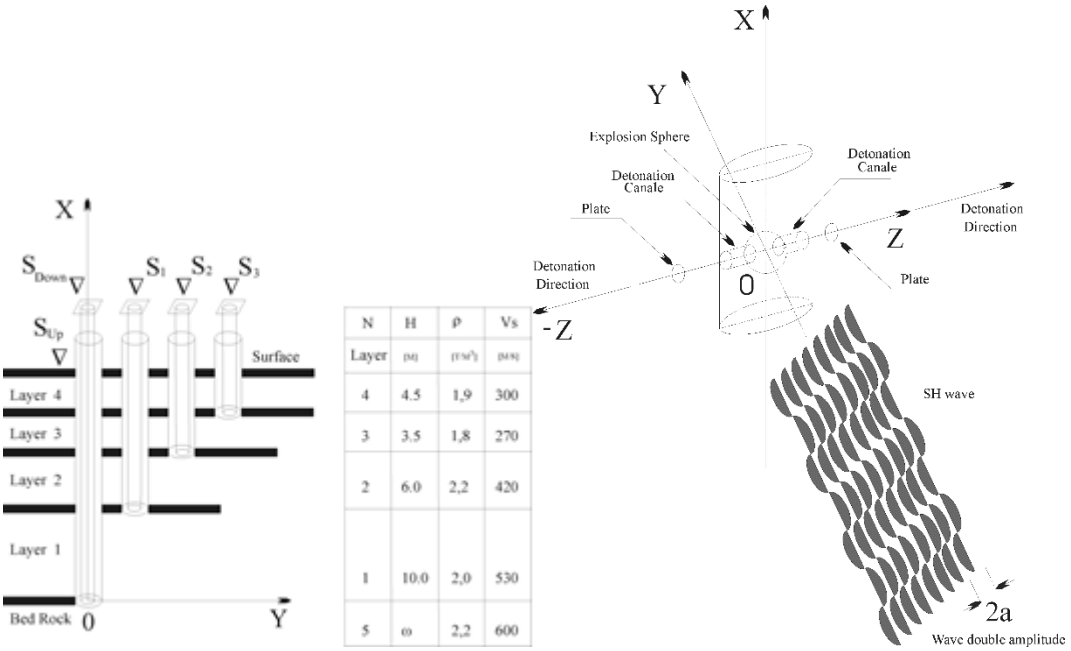
Some people sense danger – this is inherited from animals. The dog, which descended from the wolf through domestication, has the most acute sense of danger in the living world. Ten days before the disaster in Fukushima, a large group of Bulgarian scientists felt threatened and tried to get help from the then Bulgarian government. On March 10, 2011, the scientific team wrote to the Bulgarian Prime Minister that the nuclear earthquake Armageddon was imminent. The next day, on March 11, 2011, the Japanese, being fakirs, managed to remove the nuclear fuel from the Fukushima plant. If a parallel nuclear power plant outside the earthquake zone had been turned on within 10 minutes (the time of the tsunami soliton wave in the earthquake zone) and the temperature drop had begun immediately, the terrible disaster at Fukushima could have been avoided.

On December 28, 2022, the 24 Hours press group (24 Hours – 168 stories) and our scientific team warned that a catastrophic earthquake was coming to the Balkans: https://www.24chasa.bg/articla/13797525. A week later, an earthquake occurred on the island of Crete with a magnitude of M=5.7. A month and a week later, on February 6, 2023, a pair of twin earthquakes will occur in the Kahramanmaraş region with a magnitude of M=7.7 and M=7.8. Such a phenomenon with a pair of twin epicenters occurs once every 500 years. Over 60,000 people died. Bulgaria was the first in the world to come to the rescue through a rescue operation by land, air and water. The rescue mission was led by the then Deputy Prime Minister and Minister of Interior Affairs Ivan Demerdzhiev.

Seismic NPP-s micro-zoning and NPP Soil-Structure Interaction Sensors

The free field signals are very important characteristics of any seismic site. Moreover, they are essential data for the development of the two most fundamental NPP tasks connected with the construction of NPP-s: I**. Seismic NPP-s micro-zoning.** This task consists in the determining of the probability NPP-site parameters, such as: geological data, seismic region intensity, magnitudes, return periods, seismic risk analysis, seismic hazard, layer velocities, attenuation law etc . Free field experimental and numerical signals represent the most informative seismic micro-zoning characteristics of the NPP- site. All other above-mentioned parameters can be obtained using the free field signals. **II. An NPP Soil-Structure Interaction**. This task consists in determining the NPP- structure response. Bedrock or coming from one of the “layers” signals can be used as input data. The response of an NPP- structure can be obtained following the well known soil-structure interaction modelling procedures. The above mentioned tasks I and II can be solved by **III. Experimental Polygons and Sensors.** The geometrical model of the investigated geological column is shown in the figure III Polygons. It represents the official geological profile of the building site of the NPP Belene-East (shallow profile). The table shown in this figure contains the following data: layer number, depth, volume density, SH transverse wave velocity. Seismic sensors are marked with S in the **III**. The sensor registering the variation of the ground particles’ velocity is marked with SUp. The sensor registering the variation of the bedrock particles’ velocity is marked with SDown. Besides, S1, S2, S3 represent the sensors registering the velocity variation of the ground particles’ situated at the boundaries of layers 1, 2 and 3 respectively. Sensors S_{Down}, S_1, S_2, S_3 are placed upon steel plates, welded to steel tubes, fixed in corresponding layers’ boundaries. The tubes are placed in drillings, besieged by PVC tubes. Detonations are carried out into the deep drilling using the device shown in

fig.2. The sensors register all SH falling, passing and reflected waves at the corresponding layers, at bedrock and surface boundaries. The experimental work station is OYO McSEIS (Japan) type. The sensors are VEGIK (Russia) type. The sensitivity of the sensors is 0.290 [V/m.s], the natural frequency of the sensors – 11 Hz and the damping of the sensors is 28%. The constant part of the frequency response function of the sensors is from to the periods 0.03 [s] to 0.5 [s]. Amplification of the sensors is 40 000.



N	H	ρ	Vs
Layer	(m)	(T/m³)	(M/S)
4	4.5	1,9	300
3	3.5	1,8	270
2	6.0	2,2	420
1	10.0	2,0	530
5	ω	2,2	600

Fig. 1. Experimental polygon and Detonation device for SH wave generating

Sensors

The sensors described in the section III have very high characteristics. They are used when determining the signals of a NPP site free field signals. The sensors in the proposed article for National Neural Network are from a completely different type. They are lightweight and millions of them are installed in the elevators of buildings. Their characteristics are selected so that they can provide the conditions for applying Theorem 8 at any moment in time, as follows [1–13]:

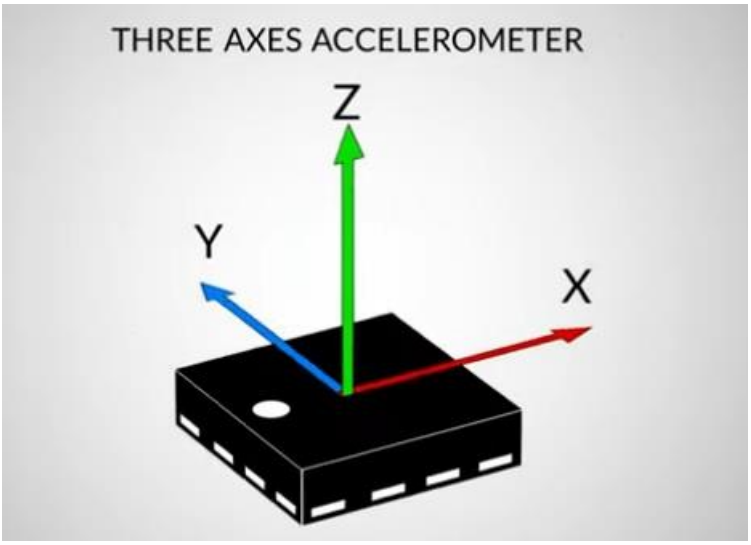


Fig. 2. Three Axes Accelerometer – Principle Scheme

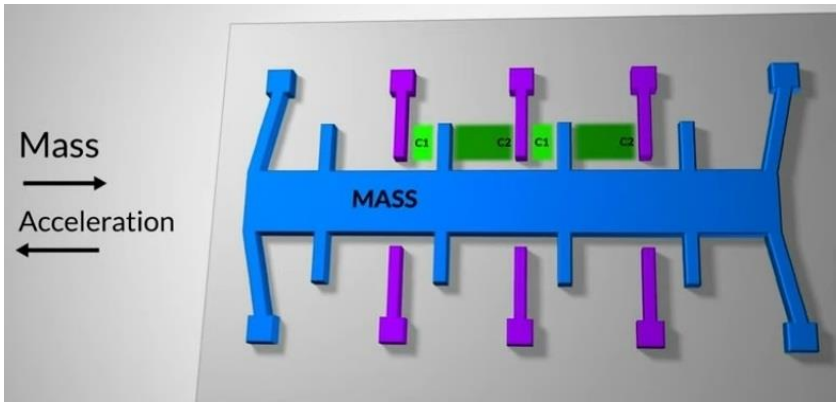


Fig. 3. MEMS Capacitive Accelerometer Type – Principle Scheme

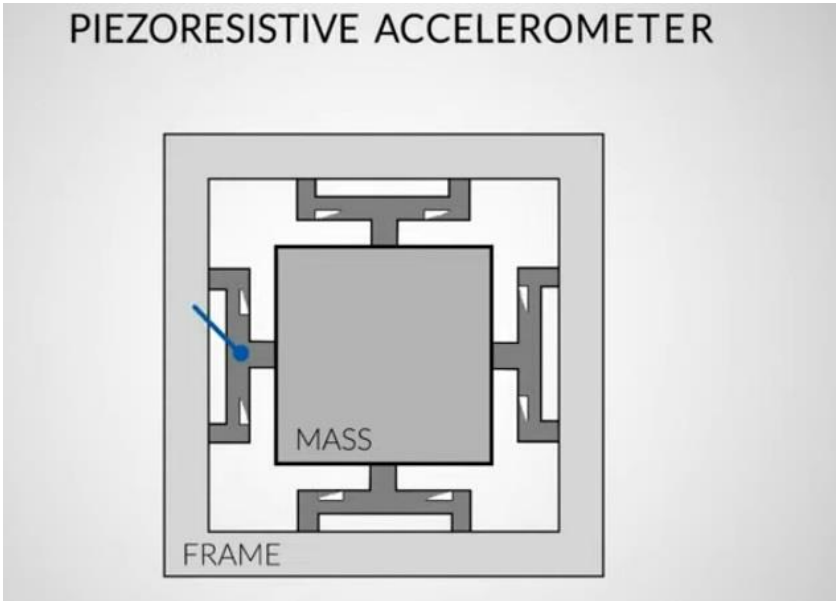


Fig. 4. Piezoresistive Accelerometers Type – Principe Scheme

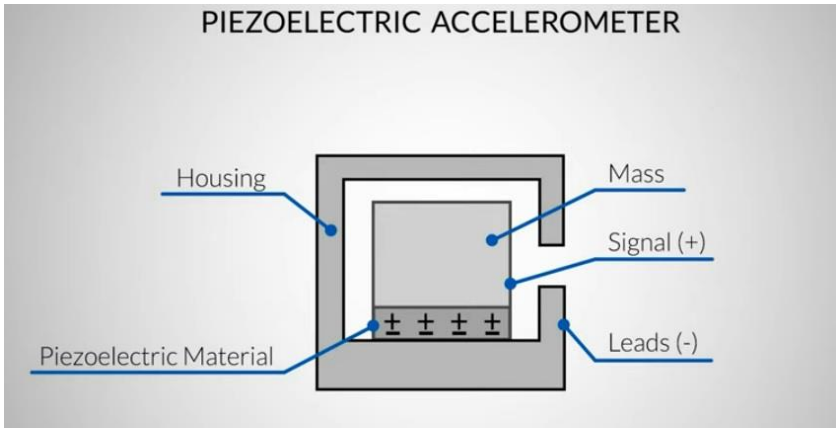


Fig. 5. Piezoelectric Accelerometer Type - Principle Scheme

There are various systems for reducing the effects of earthquake and wind on buildings and construction equipment (Кондов, В., Д.Банкова, (2023), Управление на сеизмичния риск част 1, Kondov, V., D.Bankova, (Control of the Seismic Risk part 1), Международна конференция дни на науката, Варна, 2023, Механика на машините, 131, книга 1, ISSN 0861-9727, стр.124–128, (in Bulgarian), (Kondov, V., D.Bankova, (2023), Seismic risk management part 1, Kondov, V., D.Bankova, (2023), (Control of the Seismic Risk part 2), Международна конференция дни на науката, Варна,

2023, Механика на машините, 131, книга 1, ISSN 0861-9727, стр.129–133, (in Bulgarian). In the practice in case of some of the systems a sufficient amount is used in practices high-strength materials – concrete and steel reinforcement. In other cases, variable structure systems are used to avoid resonance phenomena. Systems with automatic control of the dynamic response of the infrastructure are used in the study. The essential elements of the proposed sensors for Neural Network **Figure 2, Figure 3, Figure 4, Figure 5 [1, 2, 3, 4, 5]. Essential result are presented in the** Theorems 6 and 8. Theorem 6 represents a continuous analogue of the discrete fast transform of Cooley and Tuckey FFT **[4]. Theorem 8.** [Indestructibility of the neural network's branches, *FREQUENCY L2 ANALYSIS OF THE NATIONAL NEURAL NETWORK FOR PROTECTION OF BUILDINGS AND FACILITIES FROM SEISMIC AND WIND LOADINGS.*] The necessary and sufficient conditions for the indestructibility of the neural network's branches are: **A** (The Kinetic energy of the Network) The velocities of each of the network nodes during dynamic impacts **TENDS** to **ZERO,** and **B** (The Total Potential Energy of Deformations of the Network) The total potential energy of deformations of all nodes of the Network during dynamic impacts **TENDS** to a **MINIMUM**.

Conclusions

Theorems 1–8 forms the frequency conditions for creating of frequency analysis in space l_2 of national neural network for protection of buildings and facilities from seismic and wind loadings. In this report the sensors foe National Neural Network are presented.

Acknowledgments:

The authors express their heartfelt gratitude to: Corresponding Member of BAS Professor SDrSci. Venelin Zhivkov, Professor SDrSci. Nikolay Minchev, Professor SDrSci. Simeon Panev, Professor SDrSci. Kamen Ishtev, Professor SDrSci. Garo Mardirossyan, Associate Professor PhD Emad Abdulahad , Eng. Ilian Dinev for the invaluable help in the development of this report. Special acknowledgments for financial support by GPS Control EAD and UACG

References:

1. Ph. Philipoff, Ph. Michaylov, (2007), BELENE Nuclear Power Plant Numerical and Experimental Bedrock, Layers and Surface Signals, J. Applied Mathematical Modelling, Elsevier, impact factor = 4,4, Volume 31, Issue 9, September 2007, Pages 1889–1898 (in English)
2. Philipoff, Ph., D. Demirev, A. Yusuf, M. Islam, D.Stankov, D.Bankova, Ph. Michaylov, (2010), Some Psychology and Technical Aspects of a Rescue Operation in the Musala Peak Region (Rila Mountain), Procedia Social and Behavioral Sciences, Elsevier, WCPCG-2010. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810014837
3. Jivkov Venelin, Philip Philipoff, Anastas Ivanov, Mario Muñoz, Galerida Raikova, Mikhail Tatur, Philip Michaylov, (2013), Spectral properties of quadruple symmetric real functions, Applied Mathematics and Computation – Elsevier, impact factor= 1, impact factor= 1,766, 221 (2013) 344–350
4. Venelin Jivkov, Philip Philipoff, (2016), Quadruple Symmetric Real Signals Spectral Even and Odd Decomposition, Building Materials and Structures, UDK: 624.9.042.7, 699.841, doi: 10.5937/grmk1603003M, N3 2016, (in English), Jivkov, V., Philipoff, Ph., Quadruple Symmetric Real Signals Spectral Even and Odd Decomposition, Building materials and structures 59 (2016) 3 (63-77), ISSN 2217-8139 (Print) ISSN 2334-0229 (Online), UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1) = 861 https://www.researchgate.net/publication/311340555_Quadruple_symmetric_real_signals_spectral_even_and_odd_decomposition
6. Venkatanathan Natarajan, Philip Philipoff, (2018), Observation of surface and atmospheric parameters using ‘‘NOAA 18’’ satellite: a study on earthquakes of Sumatra and Nicobar Is regions for the year 2014 (M > 6.0), Natural Hazards Volume 92, Issue 2, 1 June 2018, Pages 1097-1112 Springer Science+Business Media B.V., part of Springer Nature 2018, Received: 7 May 2015 / Accepted: 22 February 2018, Impact factor = 2.427.

FREQUENCY L_2 ANALYSIS OF THE NATIONAL NEURAL NETWORK FOR PROTECTION OF BUILDINGS AND FACILITIES FROM SEISMIC AND WIND LOADINGS

Stanimir Karapetkov[1], Philip Philipoff[2]*, Emad Abdulahad[3*], Kamen Ishtev[1], Diana Bankova[1], Plamen Manev[6*], Elka Radeva[7], Venelin Kondov[8*], Petia Minkova[9], Daniela Arnaudova[10], Simeon Panev[1], Ivan Demerdzhiev[12], Blagovest Panev[13], Ilian Dinev[14], Galina Maslarska[15*], Mehmet Salih Bayraktutan[16], Venkatanathan Natarajan[17], Mario Muñoz Organero[18], Dimo Dimov[19]

Technical University – Sofia, Universidad Carlos III de Madrid, Spain
University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy-Sofia,
Bulgarian Academy of Sciences, Ruse University "Angel Kunchev", GPS Control EAD
e-mail: philip.philipoff.decable.dregan@gmail.com, georgosing@gmail.com, pmanev@uni-ruse.bg, venelinkondov@gmail.com, office@tls.bg

Key words: *Signal Processing in L_2; Seismic wind and fire protection; Elevator devices; Computers and Sensors; Elevator Shafts; Contemporary Seismic Micro zoning; National Neural Networks.*

ЧЕСТОТЕН АНАЛИЗ В L_2 НА НАЦИОНАЛНАТА НЕВРОНА МРЕЖА ЗА ЗАЩИТА НА СГРАДИ И СЪОРЪЖЕНИЯ СРЕЩУ СЕИЗМИЧНИ И ВЕТРОВИ НАТОВРВАНИЯ

Станимир Карапетков, Филип Филипов, Емад Абдулахад, Камен Ищев, Диана Банкова, Пламен Манев, Елка Радева, Венелин Кондов, Петя Минкова, Даниела Арнаудова, Симеон Панев,Иван Денерджиев, Благовест Панев, Илиян Динев, Галина Масларска, Мехмед Салих Байрактутан, Венханатан Натаражан, Марио Мунъос Органеро, Димо Димов

Технически Университет – София, Universidad Carlos III de Madrid, Spain,
Унижерситет по Архитектура, Строителство и Геодезия-София,
Българска Академия на Науките, Русенски Университет „Ангел Кънчев', GPS Control EAD
e-mail: philip.philipoff.decable.dregan@gmail.com, georgosing@gmail.com, pmanev@uni-ruse.bg, venelinkondov@gmail.com, office@tls.bg

Ключови думи: *Обработка на сигнали в L_2; Сеизмична, ветрова и огнезащита; Елеваторни съоръжения, Компютри и сензори, Елеваторни шахти, съвременно сеизмично райониране, Национални Невронни Мрежи.*

Резюме. *Разработката комбинира системи за активен и пасивен контрол на динамичния отговор на сгради и инженерни конструкции. В АКТИВНАТА ВЕРСИЯ на изследването, сеизмично уязвими (от 3 до 16 етажа) и ветрови (над 16 етажа) сгради с функциониращи асансьори са обединени в невронна мрежа. Основните обекти – СЕНЗОРИ и ИНЕРИЦИАЛНИ ДВИГАТЕЛИ на активните системи за управление, са разположени в асансьорните шахти на сградата (поне четири копланарни двигателя в горната част на ВСЯКА асансьорна шахта на предложената невронна мрежа, съгласно Фигура 5). Съответно на предварително изготвен инженерен проект за асансьори за ВСЯКА СГРАДА, 3D акселерометри са поставени във основите на асансьорните шахти и в горната част на асансьорните шахти. Инерционните двигатели са поставени в горната част на асансьорната шахта и на допълнителни места върху покривната конструкция (ако е необходимо по изчисления). Акселерометрите и двигателите са елементи на невронната мрежа и за всяка асансьорна шахта те образуват ВЪЗЕЛ на мрежата (съгласно предварителните условия на Теорема 8 от изследването).*

Introduction

The development combines systems for active and passive control of the dynamic response of buildings and engineering structures. In the **ACTIVE VERSION** of the study, seismically vulnerable (from 3 to 16 floors) and wind-vulnerable (over 16 floors) buildings with functioning elevators are combined into a **Neural Network**. The main objects – **SENSORS** and **INERTIAL ENGINES** of the active control systems are situated in the building elevator shafts (at least four coplanar motors at the top of the **EACH** elevator shaft of the prosed Neural Network in accordance to Figure 5.) Respectively to a previously prepared elevator engineering project for **EACH BUILDING**, 3D accelerometers are placed in the foundation of the elevator shafts and at the top of elevator shafts. The Inertial motors are placed at the top of the elevator shaft and at additional locations on the roof structure (if it is necessary by calculations). The accelerometers and motors are elements of the Neural Network, and for each elevator shaft they forms a **NODE** of the network (according the Prerequisites conditions of Theorem 8 of the study).

Unfavorable conditions. Under certain unfavorable conditions (according to the classical theory of probabilities and catastrophes at least three in number):

Unfavorable Condition 1) Earthquake with a magnitude above 6 on the Richter scale,

Unfavorable Condition 2) Coincidence and resonance between the frequency parameters of the facilities and external dynamic loads,

Unfavorable Condition 3) Duration of damage (dynamic loads exceeding certain critical values - see Figure 10 - line number 600 of the study). The damping matrix $[C_{yy}]$ in equation (2) plays an important role in automatic control theory**.**

The Neural Network produces control effects with the same characteristics as the external harmful dynamic effects, but with an **INVERTED SIGN**. This guarantees the **INDESTRUCTIBILITY of ALL NODES** of the neural network, which can be **TRIGGERED** by early warning system or systems. A theorem on the **INDESTRUCTIBILITY** of the nodes of the Neural Network has been proven. This ensures that there will be no casualties in the buildings covered by the Neural Network for any earthquake, any frequency composition of the signals, and any duration of the seismic or wind signals. It is obvious that, in the massive buildings of the construction infrastructure in modern urban agglomerations, there are buildings of the most different origin and quality. The neural network guarantees the absence of victims from harmful dynamic effects regardless of the qualities of the building infrastructure. The main goal of the research is to build such a neural network that does not allow the destruction of nodes under arbitrary earthquake loads (arbitrary magnitude, arbitrary frequency composition of the signals, arbitrary duration). The indestructibility of neural network nodes is guaranteed by the following theorems. The Theorem 8 is the focus of the study.

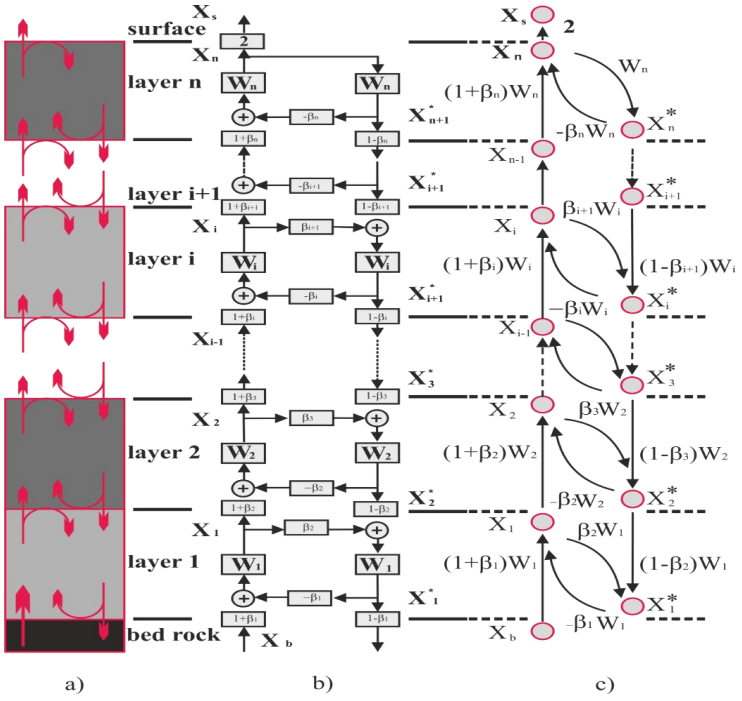


Fig. 1. Structural model of a multilayer media.
a) Reflection - Refraction process for the SH wave; b) Block diagram; c) Signal - flowchart graph

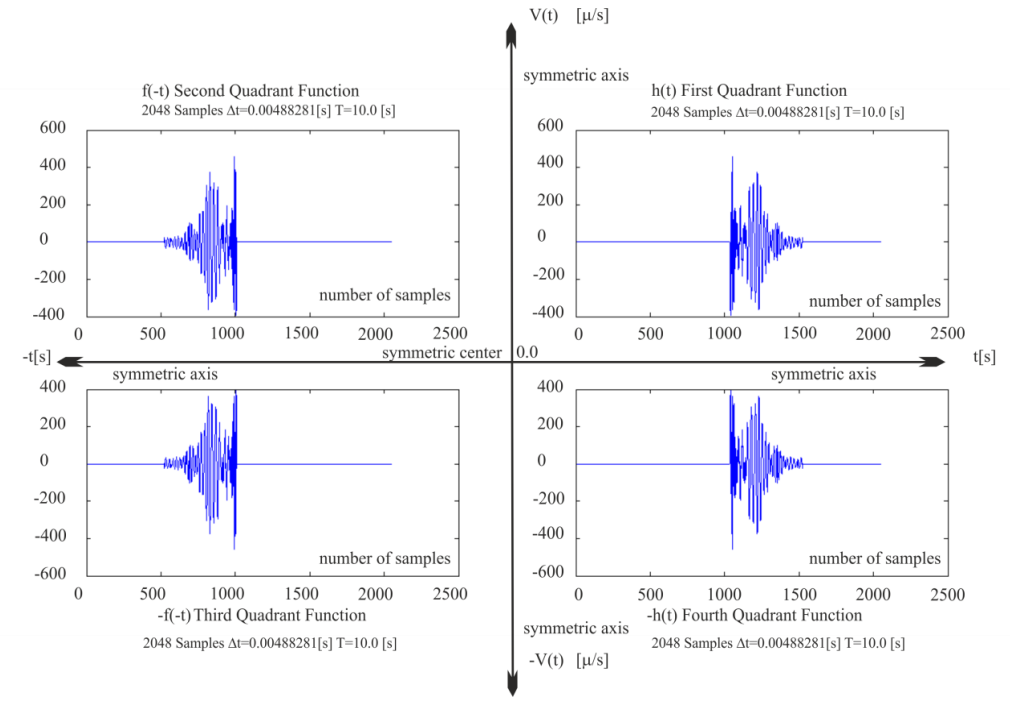


Fig. 2. Quadruple symmetric real functions – for example velocity of particles of the medium V(t) [μ/s] from Fig. 1

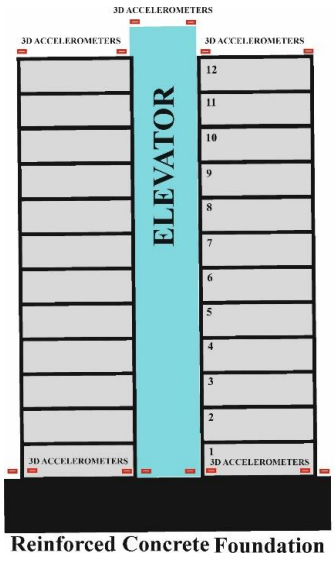


Fig. 3. Structure with 3D Accelerometers

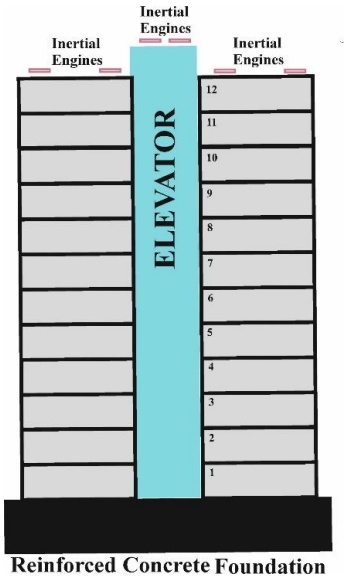


Fig. 4. Structure with Inertial Engines

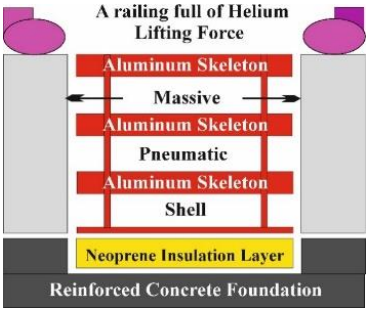


Fig. 5. System with active control of the dynamical reaction

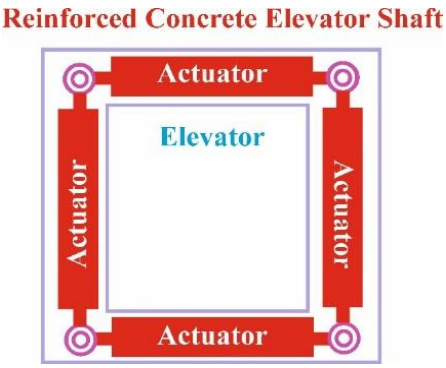


Fig. 6. System with passive contro of the dynamical reaction

Aluminum skeleton and Massive Pneumatic Shell

Development unites dynamically vulnerable (seismically vulnerable from 3 to 16 floors and wind vulnerable over 16 floors) buildings and facilities in which there are functioning elevator devices. The union is in Neural Network. Elevator shafts are the main element of active control in case of harmful external dynamic effects of seismic and wind nature. In Figure 5. inertial motors mounted on top of the elevator shaft are shown. If necessary according to an individual project to control the dynamic behavior of the building, additional inertial motors are placed on the roof of the building. Figure 6. illustrates a variant of the system with passive dynamic response control. Figure 3. shows the distribution of 3D accelerometers of an example elevator shaft in case of active control of the system. Figure 4. illustrates an example distribution of the Inertial Motors of an example building with 12 floors in an active control variant. Figure 1. It illustrates a structural model of a multilayered environment under the foundation of the example building with active management, and Figure 2. shows an example view of Quadruple symmetric real functions - medium particle velocity V(t) [μ/s].

Frequency Analysis for Arbitrary Real Functions from L_2. [1, 2, 3, 4, 5]

- **Theorem 1.** (The phenomenon "Symmetry" in the time domain corresponds to the phenomenon "Conjugation" in the frequency domain). The complex Fourier F(jω) spectra of the symmetric real functions in the first and second quadrants are conjugated as well as.
- **Theorem 2.** The complex Fourier F(jω) spectra of the symmetric real functions in the third and fourth quadrants are conjugated respectively.
- **Theorem 3** (The phenomenon "Anti Symmetry" in the time domain corresponds to the phenomenon "Anti Conjugation" in the frequency domain). The complex Fourier F(jω) spectra of the anti symmetric real functions in the first and third quadrant are anti conjugated as well as.
- **Theorem 4.** The amplitudes of the functions in first and second quadrants are both positive, while these of the amplitudes for the functions for third and four quadrants are both negative. The functions under investigation could be of arbitrary amplitudes – negative or positive. The corresponding complex Fourier F(jω) spectra also are of arbitrary type amplitudes – negative or positive.
- **Theorem 5.** (Frequency indistinguishable). Four quadruple symmetric real functions are frequency indistinguishable.

Theorems from 1 to 5 are presented in: [2] [Jivkov Venelin, Philip Philipoff, Anastas Ivanov, Mario Muñoz, Galerida Raikova, Mikhail Tatur, Philip Michaylov, (2013), "Spectral properties of quadruple symmetric real functions", Applied Mathematics and Computation – Elsevier, impact factor = 1, impact factor = 1,766, 221 (2013) 344–350].

- **Theorem 6.** [6.1. Venelin Jivkov, Philip Philipoff, (2016), Quadruple Symmetric Real Signals Spectral Even and Odd Decomposition, Building Materials and Structures, UDK: 624.9.042.7, 699.841, doi: 10.5937/grmk1603003M, N3 2016, (in English), Jivkov, V., Philipoff, Ph., Quadruple Symmetric Real Signals Spectral Even and Odd Decomposition, Building materials and structures 59 (2016) 3 (63-77), ISSN 2217-8139 (Print) ISSN 2334-0229 (Online), UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1) = 861 https://www.researchgate.net/publication/311340555_Quadruple_symmetric_real_signals_spectral_even_and_odd_decomposition ;

6.2. Венелин Живков, Симеон Панев, Филип Филипов, (2020), Разпространение на вълни в ограничени и неограничени пространства (Wave propagation in limited and unlimited spaces), "СОФТТРАДЕ", ISBN 978-954-334-341-9, (in Bulgarian)]

The phenomenon "Symmetry" in the time domain corresponds to the phenomenon "Conjugation" in the frequency domain. The phenomenon "Anti Symmetry" in the time domain corresponds to the phenomenon "Anti Conjugation" in the frequency domain. The simultaneous operation of the Theorems 1 and 3 leads to even and odd decomposition of the Fourier complex spectrum of the common function $F^{common\ function}(j\omega)$ with length N in the time domain. This result represents spectral function, composed by the equivalent nonzero real and imaginary spectral parts with length N/2 in the frequency domain $R_e^{even\ left}(\omega)$ and $jI_m^{odd\ right}(\omega)$) as follows:

$$(F^{common\ function}(j\omega) = \ 2\left(R_e^{even\ left}(\omega) + jI_m^{odd\ right}(\omega)\right) \quad (1)$$

- **Theorem 7. Damping of structures in the finite element method. (Global damping matrix [C] of the finite element models by FEM).**

If in mechanical systems the frequency equation f(ω)=0 allows only SINGLE (unit) roots $0<\omega_1<\omega_2<\ldots<\omega_k<\ldots<\omega_n$, (single own frequencies, Eigen values), it than the matrix

$$[\mathrm{W}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k, \dots \omega_n)] = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_1^3 & \omega_1^5 & \cdots & \omega_1^{2n-1} \\ \omega_2 & \omega_2^3 & \omega_2^5 & \cdots & \omega_2^{2n-1} \\ \omega_3 & \omega_3^3 & \omega_3^5 & \cdots & \omega_3^{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_n & \omega_n^3 & \omega_n^5 & \cdots & \omega_n^{2n-1} \end{bmatrix} =$$

$$= \omega_1 \omega_2 \dots \omega_n \begin{bmatrix} 1 & \omega_1^2 & \omega_1^4 & \cdots & \omega_1^{2n-2} \\ 1 & \omega_2^2 & \omega_2^4 & \cdots & \omega_2^{2n-2} \\ 1 & \omega_3^2 & \omega_3^4 & \cdots & \omega_3^{2n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n^2 & \omega_n^4 & \cdots & \omega_n^{2n-2} \end{bmatrix} \qquad \text{(a1)}$$

is POSITIVE DEFINITE $detW(\omega) > 0.$ The linear algebraic system of equations constructed using the matrix [W]:

$$\{\xi\} = [W]\{a\} \qquad \text{(b2)}$$

connects the diagonal damping matrix of the finite element model $\{\xi\}$ with the unknown principal coordinates $\{a\}$ in the formula for constructing the global attenuation matrix **, [**Tceitlin A.I., Kusainov A.A. Internal Rubbing Methods for Dynamic Structure Design. —Alma-Ata: Nauka, 1987 (in Russian)**]:**

$$[C] = [M]\sum_i a_i ([M]^{-1}[K])^i \qquad \text{(c3)}$$

(For example in formula (2) this is the matrix $[C_{yy}]$)

Indestructibility of the neural network's branches.

- **Theorem 8.** [Indestructibility of the neural network's branches.] The necessary and sufficient conditions for the indestructibility of the neural network's branches are:

A (The Kinetic energy of the Network) The velocities of each of the network nodes during dynamic impacts **TENDS** to **ZERO,** and

B (The Total Potential Energy of Deformations of the Network) The total potential energy of deformations of all nodes of the Network during dynamic impacts **TENDS** to a **MINIMUM**.

Conclusions

Theorems 1 – 8 forms the frequency conditions for creating of frequency analysis in space l_2 of national neural network for protection of buildings and facilities from seismic and wind loadings.

Acknowledgments:

The authors express their heartfelt gratitude to: Corresponding Member of BAS Professor SDrSci. Venelin Zhivkov, Professor SDrSci. Nikolay Minchev, Professor SDrSci. Simeon Panev, Professor SDrSci. Kamen Ishtev, Professor SDrSci. Garo Mardirossyan, Associate Professor PhD Emad Abdulahad , Eng. Ilian Dinev for the invaluable help in the development of this report. Special acknowledgments for financial support by GPS Control EAD and UACG.

References:

1. Ph. Philipoff, Ph. Michaylov, (2007), BELENE Nuclear Power Plant Numerical and Experimental Bedrock, Layers and Surface Signals, J. Applied Mathematical Modelling, Elsevier, impact factor = 4,4, Volume 31, Issue 9, September 2007, Pages 1889–1898 (in English)
2. Philipoff, Ph., D. Demirev, A. Yusuf, M. Islam, D.Stankov, D.Bankova, Ph. Michaylov, (2010), Some Psychology and Technical Aspects of a Rescue Operation in the Musala Peak Region (Rila Mountain), Procedia Social and Behavioral Sciences, Elsevier, WCPCG-2010. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042810014837
3, Jivkov Venelin, Philip Philipoff, Anastas Ivanov, Mario Muñoz, Galerida Raikova, Mikhail Tatur, Philip Michaylov, (2013), Spectral properties of quadruple symmetric real functions, Applied Mathematics and Computation – Elsevier, impact factor = 1, impact factor = 1,766, 221 (2013) 344–350.
4. Venelin Jivkov, Philip Philipoff, (2016), Quadruple Symmetric Real Signals Spectral Even and Odd Decomposition, Building Materials and Structures, UDK: 624.9.042.7, 699.841, doi: 10.5937/grmk1603003M, N3 2016, (in English), Jivkov, V., Philipoff, Ph., Quadruple Symmetric Real Signals Spectral Even and Odd Decomposition, Building materials and structures 59 (2016) 3 (63-77), ISSN 2217-8139 (Print) ISSN 2334-0229 (Online), UDK: 06.055.2:62-03+620.1+624.001.5(497.1) = 861
https://www.researchgate.net/publication/311340555_Quadruple_symmetric_real_signals_spectral_even_and_odd_decomposition
5. Venkatanathan Natarajan, Philip Philipoff, (2018), Observation of surface and atmospheric parameters using ‘‘NOAA 18’’ satellite: a study on earthquakes of Sumatra and Nicobar Is regions for the year 2014 (M > 6.0), Natural Hazards Volume 92, Issue 2, 1 June 2018, Pages 1097-1112 Springer Science+Business Media B.V., part of Springer Nature 2018, Received: 7 May 2015 / Accepted: 22 February 2018, Impact factor = 2.427.

INTEGRATION OF COMBINED JOINT ALL DOMAIN COMMAND AND CONTROL FOR THE PURPOSES OF THE PROJECTS UNDER THE SIMULATION EXPLORATION EXPERIENCE PROGRAM

Dimitar Dimitrov, Evgeni Andreev

Nikola Vaptsarov Naval Academy, Department of Information Technology
e-mail: dimitar@nvna.eu; e.andreev@naval-acad.bg

Keywords: *Simulation Exploration Experience, NASA, Artemis, Command and Control*

Abstract: *The article examines the LUNARITE simulation project of the Nikola Vaptsarov Naval Academy in the international simulation program Simulation Exploration Experience. The main objectives and results of the LUNARITE project are discussed. Their implementation methods and how they align with Simulation Exploration Experience and NASA's Artemis programs are also discussed. A detailed review is made of the integration of Combined Joint All Domain Command and Control in the LUNARITE project and its significance for future space mission.*

ИНТЕГРИРАНЕ НА КОМБИНИРАНО СЪВМЕСТНО КОМАНДИРАНЕ И КОНТРОЛ ВЪВ ВСИЧКИ ОБЛАСТИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА ПРОЕКТИТЕ ПО ПРОГРАМАТА SIMULATION EXPLORATION EXPERIENCE

Димитър Димитров, Евгени Андреев

Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“, Катедра „Информационни технологии“
e-mail: dimitar@nvna.eu; e.andreev@naval-acad.bg

Ключови думи: *Simulation Exploration Experience, NASA, Artemis, Командване и контрол*

Резюме: *Статията разглежда симулационния проект LUNARITE на Военноморската академия „Никола Вапцаров“ в рамките на международната симулационна програма Simulation Exploration Experience. Обсъждат се основните цели и резултати от проекта LUNARITE. Разгледани са и методите за тяхното изпълнение и как те се вписват в програмите Simulation Exploration Experience и Artemis на НАСА. Направен е подробен преглед на интегрирането на Combined Joint All Domain Command and Control в проекта LUNARITE и неговото значение за бъдещи космически мисии.*

Overview of the Simulation Exploration Experience program

The Simulation Exploration Experience (SEE) represents a pioneering, distributed platform designed to engage university teams worldwide [1] in the collaborative design, development and execution of future space mission simulations. Fundamentally grounded in open, standards-based modeling and simulation, SEE serves a dual mission: educationally, it equips students with workforce-relevant competencies in real-time distributed modeling and simulation (M&S) and technically, it demonstrates the interoperability of heterogeneous simulation components, named federates, that collectively model complex space scenarios, including lunar surface operations, cislunar activities, and planetary missions sometimes even to Mars.

Originating from the “Simulation Smackdown” challenge in 2011, SEE has matured into a robust, standards-centric learning and research environment that explicitly aligns its scenarios with NASA’s Artemis program architecture and backed from Florida Space Institute and Kennedy Space Center. This alignment has transitioned its scope from far-future speculative missions toward tangible mid-century capabilities such as the Artemis Base Camp and Gateway orbital activities. This provides participants with an authentic, systems-thinking framework centered on designing systems, defining

behaviors and orchestrating interactions, all essential for understanding multifaceted space mission dynamics.

Programmatically, SEE operates on an annual cycle culminating in an international event where teams across continents demonstrate integrated simulations, receiving critical feedback from academic, industry and government mentors. Its hybrid format combines asynchronous development phases with synchronous technical milestones and live federation executions across global time zones. Lessons from the 2018 cycle, hosted in Sofia, Bulgaria [2], highlight SEE's deeply international nature and its emphasis on mentoring, employability and community building.

The program structure includes a preparatory "Kick-Start" phase typically in September, a formal start in January and tiered engagement levels allowing institutions to select their commitment depth from observers to active participants. The scenario language embodies a systems–behaviors–interactions model, which provides a pedagogical scaffold while accommodating innovation. This framework is intricately tied to Artemis-aligned, south-polar lunar, and cislunar mission narratives, enriching the educational context.

Technically, SEE's backbone is the IEEE High-Level Architecture (HLA, 1516) standard [3], providing the runtime infrastructure, object model template, and integration rules for coordinated, time-managed simulation interactions. Given HLA's complexity, SEE supplements standards adherence with accessible development toolkits, tutorials, and mentoring. Teams develop federates, author FOM-compliant XML, and manage interaction publications through HLA's RTI services. Simulation states are visualized in NASA's Distributed Observer Network (DON) [4], which maps federate states to 3D assets for a common operational picture. Over time, SEE's technological suite has broadened to include NASA's Trick Simulation Environment and JSC Engineering Orbital Dynamics (JEOD), reducing low-level integration effort and empowering students to focus on mission logic rather than infrastructure. The SEE HLA Starter Kit advances these efforts, supporting open-source and commercial toolchains, fostering code reuse, and accelerating competency development in distributed simulation. To address domain-specific challenges, such as coherent celestial reference frames, strict time synchronization, and long-duration mission scenarios, SEE adopts the SISO Space Reference Federation Object Model (SpaceFOM) [5] as its standard baseline. SpaceFOM extends beyond data models to define critical execution roles, comprehensive compliance rules, and essential federation agreements, institutionalizing reusable patterns for execution control, spatial referencing, and time management. This institutionalization enables seamless onboarding of new teams, essential for geographically dispersed academic collaborations bound by fixed timelines. Visualization is further enhanced via DON, which renders federate states using defined metadata and coordinate transforms, ensuring spatial and temporal consistency across federations. Beyond visualization, DON acts as a real-time sanity checker aligning federate publications.

The SEE process emphasizes transparency and coordination through artifacts such as "Baseball Cards" that describe federate capabilities and interfaces and interaction matrices detailing intended data exchanges and temporal couplings. This documentation links tightly with SEE's educational framing and informs SpaceFOM's execution agreements and compliance assessments, clarifying responsibilities and enabling systematic testing. From a standards perspective, SEE functions as a living laboratory for evolving space simulation standards like SpaceFOM and HLA. Teams validate execution patterns, refine modules, and feedback into standards development, fostering a synergistic relationship where standards shape practice and practical deployments inform standards refinement. SEE's sustained implementation of SpaceFOM underscores its role as the benchmark for space-domain distributed simulation.

Finally, SEE's explicit alignment with the Artemis program [6] and Moon-to-Mars initiatives situates it at the forefront of future space operations research. Its insistence on a-priori interoperability, use of a shared visualization environment and rigorous documentation framework create an ideal testbed for exploring mission-partner data exchanges, latency constraints and coalition governance. In this way, SEE transcends pure education to become a strategic innovation platform supporting the development and demonstration of critical capabilities for interoperable, multi-actor lunar and cislunar missions. This comprehensive integration of technical rigor, pedagogical structure, international collaboration and standards stewardship makes SEE a unique and potent instrument for preparing the next generation of space mission engineers and advancing the state of the art in distributed space mission simulation.

Stages in the development of LUNARITE. Goals and objectives

Since 2018, the Nikola Vaptsarov Naval Academy (NVNA) [7] has fielded mixed teams of military cadets and civilian students to participate in the SEE. These teams are deliberately structured into four functional subgroups, like scientific research, concept design, 3D modeling and software engineering, so that each mission concept is simultaneously scientifically grounded, visually and functionally specified and executable in a distributed simulation environment. The research subgroup formulates mission aims, site selection, and operating concepts, concept artists translate these aims into vehicles, habitats,and infrastructure, 3D modelers produce low-overhead, simulation-ready assets (typically in OBJ), and programmers implement federates that interoperate through HLA and the SpaceFOM extensions used by SEE. This scaffolding mirrors real mission design workflows and has proven effective for NVNA's earlier SEE work on lunar bases, cislunar stations, and research rovers, where teams moved from concept to local tests and finally to Internet-scale federation with other universities.

A typical NVNA [8] development cycle begins with a local integration on a lab RTI using the SEE "Lunar Rover" demo to validate the build environment and message flow. After local tests pass, teams bring the NASA Distributed Observer Network visualizer online by joining its federate, which listens to federation traffic, transforms it into XML, and renders the scene in real time or replay. Only after the local/demonstrator gates are cleared does the team request credentials for the remote federation server, provided to SEE teams via Florida Space Institute, connect through VPN, and begin joint rehearsals with partner universities. This stair-step approach starting from demo, local integration, DON visualization and remote federation has become an internal standard of practice at NVNA.

The 2023 LUNARTEC concept established the baseline that LUNARITE would build upon. LUNARTEC envisioned a multi-layered lunar base located near the south pole and tied into the Gateway orbital infrastructure. Its elements included logistics hubs, research laboratories, habitation biospheres, mobility assets, habitat and explorer rovers, a heavy-lift hopper for cross-terrain cargo, ISRU for alloys, aerogels and regolith-derived cements and additive-manufacturing cells for spares and structural components. While the 2023 concept details were advanced within the NVNA team, several enabling patterns it employed are well aligned with SEE standard practice: adopting HLA/SpaceFOM for a-priori interoperability, using DON for common visualization and organizing the project's systems–behaviors–interactions early to ease federation integration. These same patterns are emphasized in the 2024 SEE Event Scenario, which directs teams to structure their work as Systems (student designs), Behaviors (what systems do) and Interactions (how systems communicate).

LUNARITE advances from a capability-centric base to an orchestrated, command-and-control-aware settlement. The central design decision is to adapt the Combined Joint All-Domain Command and Control (CJADC2) paradigm into a lunar context that includes coalition partners and mixed civil–military assets. In practice, five objectives shape the 2024 system:

1. Autonomous reconnaissance drones (sense): deploy a family of small aerial and hopper-type UAVs to map shadowed craters, characterize regolith, and scout routes.
2. AI-assisted rovers with adaptive learning (sense/make sense) [9]: integrate onboard perception and path-planning with ground-based fusion to improve traverse safety and sampling yield.
3. Ground–orbital relay network (transport): maintain resilient communications across line-of-sight disruptions via mast relays, surface repeaters, and Gateway-mediated links.
4. Semi-autonomous operations for real-time and predictive decision-making (make sense/act): prioritize work orders, re-task assets when contingencies arise, and pre-position power or spares based on forecasts.
5. Standards-based integration for coalition partners (governance): use SpaceFOM/HLA roles, documentation, and compliance rules to provide a predictable integration surface for external federates.

These objectives reflect current CJADC2 guidance emphasizing data-centricity, interoperability, and decision advantage. In defense contexts, the U.S. CJADC2 Cross-Functional Team, co-led by Joint Staff J6 and the Chief Digital and AI Office, highlights the need for shared data fabrics and common governance so that distributed sensors and effectors can be synchronized. Translating this to the Moon, LUNARITE treats each rover, habitat or relay as a data-producing/consuming node, and the SpaceFOM Master, Pacing, and Root Reference Frame Publisher roles supply the timing, execution control, and reference-frame scaffolding needed for a cohesive federation. LUNARITE follows a stage-gated plan that maps directly to SEE's academic calendar – Kick-Start in late September, official start second Wednesday in January, integration through spring – and NVNA's internal rehearsal cadence.

In LUNARITE, reconnaissance drones, AI-enabled rovers, fixed sensors and Gateway relays act as a distributed sensor grid. From a CJADC2 perspective, the aim is to minimize the observe to orient time by normalizing disparate data into a common schema at the federation boundary and maintaining assured transport even when line-of-sight is compromised. SpaceFOM's [10] pacing/time-management rules and reference frames ensure that sensor data are temporally and spatially coherent, a prerequisite for reliable fusion. LUNARITE aggregates status, plans and predictions in a mission hub that emulates the data fabric, where common data services, access control (zero-trust principles) and governance allow multiple decision aids to subscribe and act. Practically, this includes rover hazard maps, relay link budgets, and logistics burn-down charts. The goal is decision advantage: presenting the right option to the operator (or to autonomy) before conditions close a window of opportunity. The mission hub issues tasking messages to assets, re-prioritize queues, and redistributes power or spares. In coalition terms, this is where gateway functionality matters: a C2 broker pattern translates formats while preserving authoritative data. Defense C2 gateways such as ADSI illustrate how rapid data-type onboarding and protocol translation sustain interoperability among heterogeneous participants, by analogy, LUNARITE's gateway module is designed to accept partner formats and expose normalized interactions to the federation.

NVNA's participation in SEE previously produced a Mobile Lunar Base simulation emphasizing AI-supported movement, biosphere control, and cybersecurity. Lessons from that work inform LUNARITE's focus on cyber-hardening and mission management: decision aids are only as good as their data integrity and access controls. The programmatic cadence of SEE continues to provide a structured on-ramp for new students and a venue for advanced integration by returning cohorts. Incorporating CJADC2 principles into a lunar mission simulation does more than add autonomy. It forces early articulation of who can see what, when, and why – and how decisions propagate across organizational and technical boundaries. By treating every rover, drone, habitat, and relay as a participant in a governed data ecosystem – and by embedding a priori interoperability via SpaceFOM – LUNARITE aims to demonstrate that decision advantage can be engineered into exploration architectures from the outset. This is consonant with SEE's trajectory from far-future vignettes to Artemis-aligned infrastructure and with the broader shift toward distributed, resilient C2 in contested environments.

Integrating CJADC-2 into space missions

Combined Joint All-Domain Command and Control (CJADC2) [11] is the U.S. Department of Defense's strategic initiative aimed at achieving decisive warfighting advantage by enabling decision-making at the speed of relevance. CJADC2 accomplishes this by seamlessly connecting sensors, platforms, and decision aids across all military services and coalition partners to produce a unified, real-time operational picture across multiple domains, including land, sea, air, space, cyber, and electromagnetic spectrum. Its core operational concept is a streamlined cycle: Sense, Make Sense, and Act, which is implemented through data-centric, interoperable architectures, common governance frameworks, and rapid, iterative fielding of capability increments. CJADC2 evolved from the initial JADC2 strategy by explicitly incorporating multinational coalition realities and the Mission Partner Environment (MPE), highlighting that decision superiority must transcend national boundaries, heterogeneous systems, and security domains. This expansion is critical to ensuring coalition cohesion and trust while shortening time from observation to prioritized action, not merely increasing bandwidth or connections. Practitioners emphasize that CJADC2's success hinges on software-defined mission outcomes: delivering the right data to the right toolsets just as human decision-makers need them, supported but not overwhelmed by automation.

CJADC2's architecture [12] is organized into three integrated Lines of Effort (LOEs): the Data Enterprise, which standardizes access, policies, and schemas for common data sharing. Technical Enterprise, responsible for ensuring transport, cloud services, and cross-domain interoperability. Human Enterprise, focusing on tactics, training, workflows, and trust in human-machine teaming. Together, these LOEs enable end-to-end mission threads that are tested and refined in iterative experiments and exercises, such as those demonstrated by programs like the Advanced Battle Management System (ABMS), Space Development Agency's Battle Management Command and Control (BMC3), Project Convergence, and Project Overmatch. These efforts emphasize rapid capability fielding through DevSecOps practices and foundational architecture principles such as zero trust and cross-domain solutions embedded from inception.

In space operations specifically, CJADC2 manifests in mission threads with well-defined data custody, fusion, and decision timelines. For example, missile warning and tracking relies on heterogeneous space- and ground-based sensors exchanging cues with tactical command centers at machine speed, enabled by CJADC2's common data products, cross-domain authenticated transport, and human training for load management. Space Domain Awareness (SDA) similarly harnesses

sensor fusion across government and commercial sources through enforced non-proprietary interfaces and zero-trust gateways to protect sensitive data while allowing partner collaboration. Tactical satellite communications and dynamic satellite tasking require agile reallocation of bandwidth and latency capacities amidst contested environments, supported by continuous Authority To Operate and containerized deployment of waveform translators and payload software, dramatically shortening response times.

Operationally, CJADC2 space command and control can be visualized in a four-tier architecture connected by a governed data fabric: the On-Orbit Edge (satellites with crosslinks and onboard processing), Ground Entry/Relay nodes (gateways and tactical edges), Operations Centers (Combined Space Operations Centers and service Air Operations Centers) and the Joint/Coalition Mission Cloud (accredited cloud environments running fusion analytics and orchestration). Within and between these tiers, C2 gateways normalize and translate legacy and modern data formats, enforce security policies and provide resilient fallback options, enabling integrated, survivable command chains across multinational domains.

Practically, gateways like the modernized Air Force Advanced Data Services Interface (ADSI) [13] exemplify the requirements for multi-link brokering, containerized deployments and rapid reauthorization cycles critical for real-world CJADC2 operations. For space missions, analogous gateways mediate between satellite telemetry, tactical links, commercial ground services and coalition enclaves, significantly reducing operator burden and accelerating command decision cycles.

Multinational space collaboration, covering missile warning, debris attribution and coalition SATCOM, relies heavily on Mission Partner Environment constructs and robust joint doctrine such as CJCSI 6290.01A [14]. This playbook coordinates mission impact assessments, materiel and doctrinal adjustments and ensures partners achieve interoperability from Day 1 without resorting to ad hoc integrations. However, challenges persist as proprietary interfaces and non-standard APIs inhibit system evolution and rapid integration, a concern highlighted by governmental audit agencies. Programs are strongly encouraged to adopt Modular Open Systems Approaches (MOSA) [15] and enforce open interface standards contractually, especially for incorporating commercial space data within national and allied sensor networks supporting time-sensitive warning timelines.

CJADC2's evolutionary nature is underscored through continual technology maturation via live demonstrations and war games. These events foster innovation in human-machine teaming, sensor fusion and resilient networking, including countering autonomous threats and swarm tactics, building a foundation that extends seamlessly between terrestrial and space operational domains [16]. Yet, institutional gaps remain, such as insufficient lessons-learned dissemination, which could slow enterprise-wide adoption and operationalization of CJADC2's promising capabilities.

In summary, CJADC2 is not merely a connectivity or data-sharing program but a transformational concept enabling integrated, coalition-aware, domain-spanning command and control. Through iterative development, open standards, layered architectures, and a joint commitment to human-machine collaboration, CJADC2 aims to shorten decision cycles, improve situational awareness, and maintain strategic information advantage.

Conclusion

SEE and NVNA's LUNARITE together highlight how a standards-driven academic ecosystem can evolve into a credible proving ground for space command-and-control concepts. By adopting the IEEE High-Level Architecture standard together with SpaceFOM from the start, SEE integrates interoperability as a core design principle rather than an afterthought. Its framework of systems, behaviors, and interactions, combined with NASA's Distributed Observer Network for shared visualization and rigorous documentation like baseball cards and interaction matrices, enables globally dispersed teams to build time-synchronized, coherent federations. NVNA's mixed cadet and civilian teams translate scientific objectives into executable simulation assets, progressing methodically from local testing to large-scale international federation exercises.

LUNARITE builds on this foundation by embedding the Combined Joint All-Domain Command and Control (CJADC2) decision cycle Sense, Make Sense and Act, within lunar mission operations. Autonomous drones and AI-enabled rovers generate data fed into a governed data fabric where SpaceFOM's standardized roles maintain temporal and spatial consistency. A gateway broker pattern ensures secure, standardized data exchange and enforces command policies, enabling timely tasking and coordination among surface and orbital assets. This creates not only a functional simulation federation but also an instrumented decision system measuring critical metrics such as decision latency, communication reliability, situational awareness, and interoperability, directly supporting the goal of decision advantage.

References:

1. Ghorbani, M., et al. Simulation Exploration Experience (SEE) introductory tutorial. 2024 Winter Simulation Conference (WSC), Orlando, FL, USA, 1368–1382, 2024. https://doi.org/10.1109/WSC63780.2024.10838847
2. University of Library Studies and Information Technologies, Simulation Exploration Experience 2018 Workshop and Conference, 8–10 May, Sofia – "Live and remote" remote participation from everywhere, face-to-face in Sofia, Bulgaria, hosted and organized by BULSIM and the Michaelis Global Education Foundation, 2018. Available online at: https://edu.unibit.bg/pluginfile.php/86/mod_forum/attachment/2162/SEE%202018%20Agenda.pdf
3. Almaksour, A., et al., The use of the IEEE HLA standard to tackle interoperability issues between heterogeneous components. 2022 IEEE/ACM 26th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), Alès, France, 175–178, 2022. https://doi.org/10.1109/DS-RT55542.2022.9932042
4. Ghorbani, M., et al. Want to build a Moonbase? The Simulation Exploration Experience (SEE). Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop 2025 (SW25), 2025. https://doi.org/10.36819/SW25.005
5. Crues, E. Z., et al., SpaceFOM – A robust standard for enabling a-priori interoperability of HLA-based space systems simulations. Journal of Simulation, 16(6), 624–644, 2021. https://doi.org/10.1080/17477778.2021.1945962
6. Bocciarelli, P., et al. A model-driven approach to enable the simulation of complex systems on distributed architectures. SIMULATION, 95(12), 1185–1211, 2019. https://doi.org/10.1177/0037549719829828
7. Andreev, E., et al. Creating Moon port and spaceship simulations in a virtual environment. AIP Conference Proceedings, 2048(1), 020028, 2018. https://doi.org/10.1063/1.5082046
8. Andreev, E., et al. Educational NASA project: Artificial intelligence and cybersecurity at a mobile lunar base. Information & Security: An International Journal, 46(3), 321–333, 2020. https://doi.org/10.11610/isij.4624
9. Николов, Д., Анализ на планирането и изпълнението на киберупражнения. Девета международна научна конференция „Радиационната безопасност в съвременния свят", 2025, с. 146–158. ISSN 2738-7607
10. Bruzzone, A., et al. Interoperable simulation for space logistics & operations for a Moon base. Proceedings of the 20th International Conference on Modeling & Applied Simulation (MAS 2021), 190–193, 2021. https://doi.org/10.46354/i3m.2021.mas.024
11. Stewart, T., et al. Harnessing advanced technologies for swarm operations within CJADC2. SAE Technical Paper 2024-01-4116, 2023. https://doi.org/10.4271/2024-01-4116
12. To, J. Defense command and control: Further progress hinges on establishing a comprehensive framework. U.S. Government Accountability Office, GAO-25-106454, 2025. Available online at: https://www.gao.gov/assets/gao-25-106454.pdf
13. Ultra I&C, ADSI: Newly modernized for CJADC2, 2024. Available online at: https://www.ultra-ic.com/media/akrfaicl/adsi-datasheet-11sep25.pdf
14. Sigma Defense, A CJADC2 Primer: Delivering on the Mission of "Sense, Make Sense, and Act", 2023. Available online at: https://sigmadefense.com/wp-content/uploads/2023/09/CJADC2-White-Paper-Primer5.pdf
15. Marler, T., et al., Assessment of Joint All Domain Command and Control requirements and the use of live, virtual, and constructive capabilities for training. RAND Corporation, Santa Monica, CA, 2023. Available online at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA985-2.html
16. Breaking Defense, JADC2 gets its first C2 gateway authorized to update itself, 2024. Available online at: https://info.breakingdefense.com/hubfs/GAMECHANGER_ADSI_C2_Gateway_Ultra_Intelligence_Communications_Breaking_Defense.pdf

OVERVIEW OF THE THREAT OF CYBER INCIDENTS IN THE SPACE DOMAIN

Dimitar Dimitrov, Evgeni Andreev

Nikola Vaptsarov Naval Academy, Department of Information Technology
e-mail: dimitar@nvna.eu; e.andreev@naval-acad.bg

Keywords: *cyber incidents, space domain, spacecraft, KA-SAT*

Abstract: *The report examines the threat of cyber incidents related to the space domain. It reviews the main techniques, tactics, and procedures that hackers can use to compromise the security of spacecraft and missions. Some of the most high-profile and high-risk attacks on the space sector, both on the ground and in space, are discussed. Focus is placed on the hacking attack on Viasat's KA-SAT network in 2022.*

ОБЗОР НА ЗАПЛАХИТЕ ОТ КИБЕР ИНЦИДЕНТИ В КОСМИЧЕСКАТА ОБЛАСТ

Димитър Димитров, Евгени Андреев

Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров“, Катедра „Информационни технологии“
e-mail: dimitar@nvna.eu; e.andreev@naval-acad.bg

Ключови думи: *киберинциденти, космическата област, космически апарати, KA-SAT*

Резюме: *Докладът разглежда заплахата от киберинциденти, свързани с космическата област. В него се прави преглед на основните техники, тактики и процедури, които хакерите могат да използват, за да компрометират сигурността на космически апарати и мисии. Обсъждат се някои от най-значимите и високорискови атаки срещу космическия сектор – както на наземните сегменти, така и в орбита. Акцентът е поставен върху хакерската атака срещу мрежата KA-SAT на Viasat през 2022 година.*

Introduction

As the post-digital era takes hold, cyberspace and outer space are no longer separable technical realms but a fused, interdependent infrastructure. Satellites, ground stations, cloud-enabled mission control and user terminals now operate as a single cyber-physical system that underpins communications, navigation, finance, logistics and defense. This digitalization of space expands the attack surface from the spacecraft itself to the entire lifecycle and supply chain, binding orbital assets to terrestrial networks and making cyber risk inseparable from space operations. In policy and doctrine alike, space and cyber are increasingly treated as mutually enabling operational environments, in practical terms, modern space capabilities ride on the same networks, protocols and software stacks that shape cyberspace.

Within this integrated system, cyber incidents against space infrastructure now constitute national-security concerns rather than narrow technical anomalies. The February 2022 cyber operation against Viasat's KA-SAT [1] network illustrates the point: Russian military intelligence (GRU) first used DDoS to disrupt terminals, then exploited a misconfigured VPN in the management segment to push the AcidRain wiper to thousands of SurfBeam 2 modems, degrading Ukrainian military connectivity and producing cascading civilian effects across Europe. Beyond the immediate loss of service, the KA-SAT incident exposed cross-sector dependencies, for example, German wind farms SCADA connectivity, where a single disruption in satellite internet propagated risk to power and emergency services, highlighting how commercial, dual-use systems can become strategic targets in conflict. Compiled evidence from the Russo-Ukrainian war further shows a marked uptick in cyber

activity directed at the space sector. This operational reality is situated within the broader context of strategic competition. Commercial mega constellations and private ground infrastructure have become critical factors for military C2 and national resilience, driving adversaries to use cost-effective, deniable cyber means against space systems rather than kinetic attacks that produce fallout. Non-state hackers operate as ecosystems of proxies, often represented or supported by state interests and are more active against space targets, while threats openly discuss space systems as ultimate challenges, indicating both heightened intent and a learning curve that accelerates with each widely publicized incident. Although many attacks remain unsophisticated, the overall pace, the variety of targets, such as national agencies to manufacturers and service providers, and the timing around political events indicate that cyber operations against space assets are becoming normalized tools of influence and disruption in crises that do not reach the level of war.

At the same time, governance and standards have struggled to keep pace with this convergence. ENISA's 2025 Space Threat Landscape [2] emphasizes the need for sector-specific, lifecycle-aware controls and notes gaps despite recent advances such as NASA's Space Security: Best Practices Guide (2024), ECSS's Security in Space Systems Lifecycles (2024), and longstanding US policy direction in Space Policy Directive-5 (SPD-5) [3]. Technically, defense-in-depth architectures and threat-informed requirements remain the cornerstone of spacecraft and ground-segment protection, but their translation into consistently engineered baselines across civil and commercial programs is uneven an asymmetry that adversaries can and do exploit.

Overview of the attack surface of the space domain

The digitization of space infrastructure has transformed satellites from isolated orbital artifacts into nodes of a vast, software-defined, cyber-physical system. Mission planning, tasks, telemetry, and data usage increasingly depend on ground networks, cloud services and automated update channels. In this configuration, the space domain is inseparable from the cyber substrate that brings it to life. The ENISA report on space threats highlights this very link between the life cycle [4] (design, manufacturing, launch, operation and decommissioning), arguing that risk now accumulates across all phases and actors, rather than at a single technical boundary. The CSS analysis [5] also notes that cyberspace and outer space share open, cross-border, and immaterial characteristics that encourage exploitation, especially as satellites adopt internet connectivity and software-defined control.

A practical way to think about this unified domain is through the classic segmentation of ground, space, and user segments, each supported by the connection itself. The ground segment encompasses mission control systems, electrical ground equipment, satellite control centers, and business IT environments (email, ERP), all connected via wide area networks and Space Link Extension for data exchange with telemetry, tracking, and command stations. The space segment covers the bus, payload, onboard software, attitude and data control, and interfaces between satellites or between space and ground. The user segment covers terminals and end devices through which services are used and commands can be relayed indirectly. ENISA's asset taxonomy maps these segments to life cycle phases and actors, clarifying where third-party dependencies and supply chain risks arise. This scaling of the system of systems expands the attack surface. In the ground segment, adversaries can exploit misconfigurations in remote access, such as VPNs, weaknesses in identity and access management or insufficient segregation between business IT and operational networks. Once footholds are established, the control planes that coordinate fleets of terminals or modems become attractive targets, enabling broad, synchronized effects.

Within the space domain, vulnerabilities stem from design choices as well as inherent physical limitations. Space vehicles operate as interconnected computing systems linked through unstable wireless channels and the notion that outer defenses alone suffice has resulted in inadequate internal partitioning and unprotected operations that falter when perimeters are violated. Aerospace sector standards, grounded in threat analysis, highlight dangers such as vulnerable or unverified control pathways, overrides of encryption in protected configurations, inadequate foundational security and verification for operational software and the possibility of mission loads causing power exhaustion that leaves the craft in a compromised condition. These standards advocate for secure boot processes with extensive safeguards, verification of directives, isolation of communication lines, improved fault handling and resilient security states that sustain verification and data protection amid adversity.

The data link layer serves as a prime target for threats. While jamming and spoofing are still prevalent, the protection of data confidentiality and integrity at this layer relies heavily on secure protocols and rigorous cryptographic practices. Guidelines from the CCSDS on securing space data offer protections at the link level for confidentiality, integrity and authentication, yet adoption varies widely, particularly in commercial areas where encryption is sometimes viewed as optional. Flaws in protocols, inadequate key handling and restricted algorithm adaptability create exploitable weaknesses in both uplink and downlink communications, amplified by the use of software-defined

radios and adaptable payloads that expand the system's adaptability and potential entry points for attacks. Within the consumer market, diversity and volume heighten vulnerabilities. Terminals used by individuals or businesses are frequently situated beyond secure operational settings, with their software origins, update routines, and setup standards often falling short of ideal security measures. The KA-SAT incident illustrated this, where a system intended for overseeing a network of modems was hijacked to distribute harmful updates once compromised, revealing how user-end devices can escalate broader system failures. Across multiple areas, the supply chain and development processes reveal widespread vulnerabilities. Spacecraft and ground systems depend on commercial off-the-shelf (COTS) parts and firmware sourced globally, which can lead to risks such as tainted hardware, counterfeit components or software supply chain attacks. Research by Bailey [6] supports the certification of trusted suppliers (DMEA accreditation for critical microelectronics), rigorous evaluation before silicon fabrication, and strict control of development environments to prevent insertion of malicious code and to ensure traceability and uniformity in production. Protecting design resources like command dictionaries, FMEA/FMECA reports, and system blueprints is equally important because their exposure speeds up adversaries' ability to find system vulnerabilities.

Recent conflict data emphasize that these vulnerabilities are actively targeted. The CSS/ETH Zürich dataset documenting the Russo-Ukrainian conflict since 2022 shows over 100 cyber incidents mostly aimed at ground infrastructure [7] such as web services, corporate networks, and user devices, while major destructive attacks like the KA-SAT incident are rare but severe. The threat actors tend to be generalists exploring the space sector rather than specialists, sometimes mistakenly hitting unintended targets, reflecting limited current expertise but fast-changing threats. Hacktivist groups with varying state ties have attacked space-related targets, and state-sponsored cyber activities are likely underreported, only appearing publicly in high-profile or officially recognized cases.

In this developing threat landscape, embedding security by design is an essential engineering priority. ENISA stresses integrating security by design and default across the satellite lifecycle, supported by asset classification and interoperable safeguards, aligning with EU initiatives such as NIS2 and the Cyber Resilience Act. Standards efforts like ECSS lifecycle security and IEEE P3349 and secure development lifecycle strategies for link-layer defense are also important. In the U.S., Space Policy Directive-5 promotes risk-based cybersecurity principles and collaboration with commercial partners to set baseline standards [8]. Aerospace guidelines translate these principles into practice by advocating a threat-informed, layered defense that anticipates breaches, ensuring authenticated and encrypted operations even under compromise.

TTPs in space cyber operations

At the radio level, electronic warfare tactics like jamming and spoofing are fundamental techniques because they provide immediate denial or deception without needing deep system infiltration. Jamming disrupts telemetry [9], tracking, command links, or mission data channels, causing traditional availability issues and forcing devices or spacecraft to enter limited operational modes. Spoofing exploits weaknesses in authentication or anti-replay mechanisms, causing system misbehavior. According to Bailey’s research, these are top risks: jamming is specifically coded under SV-AV-1, while spoofing and replay attacks align with command-link intrusions under access control threats (SV-IT-1, SV-AC-2) [10]. The protective measures focus on authenticated, encrypted communications, anti-replay protections, and disciplined key management so spacecraft never accept unauthorized commands or weaken cryptographic safeguards during recovery.

The KA-SAT attack demonstrates related ground-based tactics, where attackers exploited poorly managed remote access to move laterally into privileged control domains and execute objectives using operators’ own tools [11]. This operation was made more resilient by using the management network, which controls customer terminals, as a distribution channel for destructive payloads, allowing targeted, synchronized effects on the fleet. Also, attackers combined destructive malware with denial-of-service attacks on KA-SAT’s DHCP services, overwhelming recovery attempts and prolonging disruption. Open-source analyses highlight common initial access methods such as VPN misconfigurations and credential reuse in enterprise contexts. When malware targets space operations, it generally prioritizes rapid spread and impact over stealth [12]. AcidRain malware exemplifies this by leveraging trusted channels to degrade endpoints below recoverable software states, imposing costly physical remediation burdens. ENISA’s analysis highlights the severe consequences of firmware corruption and destructive updates, especially given satellite networks’ large scale, where operator errors can cause mass device failures.

While focus often lies on terminals and ground IT assets, attackers also target spacecraft onboard software and fault management, trying to exploit recovery modes. Bailey emphasizes the risk of safe modes that disable cryptographic protections or relax command authentication, which could

enable injection or replay attacks. Therefore, cyber-safe modes maintaining encryption and authentication, secure boot chains, and strict inter-bus segregation on spacecraft are vital safeguards.

Adversaries increasingly employ a combination of technical tactics, techniques, and procedures (TTPs) alongside obfuscation and narrative manipulation strategies. Concurrent distributed denial-of-service (DDoS) or electronic warfare (EW) activities [13] often serve as distractions that conceal more covert intrusions into management planes. Additionally, adversaries' self-attribution tactics obfuscate public understanding and complicate communication efforts among operators. Reflections by Viasat's security leadership underscore the importance of detecting recurring attack patterns early to fortify defenses proactively, while cautioning that false-flag operations and cloud data leakages may inadvertently accelerate adversaries' learning processes [14]. The growing prevalence of cyberattacks targeting space-related entities signals a shift from a niche, low-volume threat landscape to one characterized by political signaling. Consequently, rudimentary techniques such as DDoS, basic intrusions, and opportunistic spamming persist alongside sophisticated state-level operations [15].

The predominant chain of TTPs in the space sector is pragmatic and multi-layered, typically involving terrestrial entry points created by misconfigurations or partner vulnerabilities, lateral movements targeting orchestration or update infrastructures, and synchronized attacks executed at population scale [16], including malicious configurations and destructive updates, augmented by denial-of-service campaigns at the link layer or DHCP flooding. Where possible, attackers also exploit recovery processes or safe-mode functionalities within spacecraft. Effective defense-in-depth strategies reflect this complexity and are well-documented across authoritative sources. These include the implementation of authenticated, anti-replay command links that maintain continuous cryptographic protections; robust root-of-trust and verified boot processes; stringent segmentation of buses and enclaves; rigorously managed, signed, and monitored update channels with rollback capabilities; and lifecycle-aware ground control systems that treat management planes as critical assets. The KA-SAT incident exemplifies how commonplace IT tradecraft, when magnified by the scale and centralization inherent to satellite networks, constitutes a significant threat vector, highlighting that cyber adversaries extend traditional cyber tactics to the unique operational context of space infrastructure [17, 18].

Conclusion

The cybersecurity threat landscape in the space domain has become increasingly complex, dynamic, and critical, reflecting the deep integration of cyberspace and outer space into a unified cyber-physical ecosystem. Satellites and their supporting ground infrastructures now underpin vital global functions in telecommunications, navigation, finance, defense, and emergency services, making them essential yet vulnerable assets with a broad attack surface spanning design, manufacturing, launch, operation, and decommissioning phases. High-profile incidents such as the 2022 Viasat KA-SAT attack illustrate how adversaries exploit common IT weaknesses, like misconfigurations, poor access controls and supply chain risks, to achieve disruptive outcomes at scale, revealing how traditional cyber tactics are adapted and amplified in space contexts.

The threats originate from a diverse set of actors, including state-affiliated groups, proxies, hacktivists, and cyber criminals, who increasingly apply layered tactics, techniques and procedures involving jamming, spoofing, lateral network movement, destructive malware deployment, and obfuscation through concurrent electronic warfare or denial-of-service activities. These methods mask sophisticated intrusions targeting management and command planes and recovery mechanisms, significantly complicating detection and mitigation efforts. Moreover, the hybridization of threat narratives and false-flag operations reflects the strategic role cyberattacks on space assets play in political signaling and influence operations, underscoring the importance of threat intelligence and attribution in shaping defense postures.

Significantly, the space cybersecurity challenge demands holistic risk management that integrates ground IT security with space hardware and software assurance throughout the satellite lifecycle. Operators must recognize that vulnerabilities often originate on human error, insecure engineering or supply chain compromises and that exploiting these can enable cascading disruptions affecting entire satellite constellations and the critical services they deliver. Enhanced data sharing, regulatory frameworks, and collaborative information-sharing centers contribute toward a stronger collective defense, but proactive engagement and continual adaptation by all stakeholders remain imperative.

References:

1. Kazi, A., et al. Invisible battlefields: analyzing the Viasat attack and its broader implications. Scientific Bulletin (Nicolae Balcescu Land Forces Academy) 30(1), 59–67, 2025. https://doi.org/10.2478/bsaft-2025-0007
2. ENISA. ENISA Space Threat Landscape 2025. European Union Agency for Cybersecurity, 2025. Available online at: https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/2025-03/Space_Threat_Landscape_Report_fin.pdf
3. Anjum, N., and T. Farheen. SoK: Securing the final frontier for cybersecurity in space-based infrastructure. Available online at: https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.17064
4. Cucinschi, A. Cyber and space domains – Impact on the development of the multi-domain operations. Bulletin of "Carol I" National Defence University (BNDU) 12(1), 80–91, 2023. Available online at: https://revista.unap.ro/index.php/bulletin/article/view/1677
5. Poirier, C. Understanding cybersecurity in outer space. Center for Security Studies, ETH Zurich, 2024. Available online at: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/CSSAnalyse343-EN.pdf
6. Bailey, B. Cybersecurity protections for spacecraft: a threat-based approach. The Aerospace Corporation, 2021-04-29. Available online at: https://aerospace.org/sites/default/files/2022-07/DistroA-TOR-2021-01333-Cybersecurity%20Protections%20for%20Spacecraft--A%20Threat%20Based%20Approach.pdf
7. Poirier, C. Hacking the cosmos: Cyber operations against the space sector. Cyber defense Report, Center for Security Studies, ETH Zurich, October 2024. Available online at: https://css.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities-studies/pdfs/cyber-reports-2024-10-hacking-the-cosmos.pdf
8. Fleming, C., et al. Securing commercial satellites for military operations: a cybersecurity supply chain framework. International Conference on Cyber Warfare and Security 18(1), 85–92, 2023. https://doi.org/10.34190/iccws.18.1.1062
9. Atanasov, V. E. and I. Iliev. Electrocardiogram signal processing: integrating filter fusion techniques. Diagnostyka 26(4), art. no. 2025402, 2025. https://doi.org/10.29354/diag/211623. Available online at: https://doi.org/10.29354/diag/211623
10. Waterman, S. Hackers attacked satellite terminals through management network, Viasat officials say. Air & Space Forces Magazine, 2022. Available online at: https://www.airandspaceforces.com/hackers-attacked-satellite-terminals-through-management-network-viasat-officials-say/
11. Sharmin, A., et al. Cyber attacks on space information networks: vulnerabilities, threats, and countermeasures for satellite security. Journal of Cybersecurity and Privacy 5 (3), article 76, 2025. https://doi.org/10.3390/jcp5030076
12. Barrett, T. Looking to the skies: the importance of satellite cybersecurity. United States Studies Centre, 2024. Available online at: https://www.ussc.edu.au/the-importance-of-satellite-cybersecurity
13. Mura, A. An analysis of the cyberattack against ViaSat of February 2022, 2022. Available online at: https://centri.unibo.it/computational-social-science/it/cosa-facciamo/our-students-papers/mura_cs-cw2024_final.pdf/@@download/file/Mura_CS&CW2024_FINAL.pdf
14. Klein, J.. Space and cyber warfare as one. CSIS, 2024. Available online at: https://www.csis.org/analysis/space-and-cyber-warfare-one
15. Poirier, C. Cyber operations against the space sector in the Russo-Ukrainian War. Russian Analytical Digest 328, p. 20, 2025. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000738640
16. Nikolov, D. Концептуален подход за създаване на сценарии за киберучения, базиран на основни модели за анализ на кибератаки и пробиви в сигурността. SiT Review 2, 10–24, 2025. ISSN 2738-7593
17. Bitic, A. G. The supply chain vulnerability in EU space infrastructure. VOYCE. Available online at: https://voycecommunity.eu/our-work/f/the-supply-chain-vulnerability-in-eu-space-infrastructure
18. Leventopoulos, S., and N. Benias. Cyber warfare affecting land, sea, air and space operations. Journal of Computations and Modelling no. 7, 29–34.

UTILIZING OPEN-SOURCE INTELLIGENCE AND SATELLITE IMAGERY FOR ANALYSIS OF CHINA'S MILITARY MODERNIZATION

Dimitar Dimitrov, Evgeni Andreev

Nikola Vaptsarov Naval Academy, Department of Information Technology
e-mail: dimitar@nvna.eu; e.andreev@naval-acad.bg

Keywords: *GEOINT, OSINT, Chinese military modernization, satellite data*

Abstract: *The exponential growth of open-access satellite data and analytical platforms is transforming the landscape of modern intelligence collection. This article explores the strategic and operational utility of OSINT derived from satellite imagery, emphasizing how GEOINT can be integrated with publicly available data to support national security, environmental monitoring, and military analysis.*

With the proliferation of high-quality satellite missions, intelligence analysts now possess powerful observation capabilities without relying on classified or commercial sources.

The practical part presents a case study on China's military modernization. Using multi-temporal satellite imagery, the analysis identifies potential expansions of airfields, missile systems, and naval facilities. This demonstrates how satellite-based OSINT can provide actionable intelligence without access to classified sources, thereby enhancing both situational awareness and long-term monitoring capabilities for state and non-state actors alike.

ИЗПОЛЗВАНЕ НА РАЗУЗНАВАНЕ С ОТВОРЕН ДОСТЪП И САТЕЛИТНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗА АНАЛИЗ НА ВОЕННАТА МОДЕРНИЗАЦИЯ НА КИТАЙ

Димитър Димитров, Евгени Андреев

Висше военноморско училище „Н. Й. Вапцаров", Катедра „Информационни технологии"
e-mail: dimitar@nvna.eu; e.andreev@naval-acad.bg

Ключови думи: *GEOINT, OSINT, военната модернизация на Китай, сателитни данни*

Резюме: *Експоненциалният растеж на сателитните данни с отворен достъп и аналитичните платформи трансформира пейзажа на съвременното събиране на разузнавателна информация. Тази статия изследва стратегическата и оперативна полезност на OSINT, извлечен от сателитни изображения, като подчертава как GEOINT може да се интегрира с публично достъпни данни, за да подпомогне националната сигурност, мониторинга на околната среда и военния анализ.*

С разпространението на мисии с висококачествени сателити, разузнавателните анализатори разполагат с мощни възможности за наблюдение, без да разчитат на класифицирани или търговски източници. Практическата част провежда казусово проучване върху военната модернизация на Китай. Използвайки мулти-времеви сателитни изображения, анализът идентифицира потенциални разширения на летища, ракетни системи и военноморски съоръжения. Това демонстрира как сателитният OSINT може да осигури действена разузнавателна информация без достъп до класифицирани източници, като по този начин подобрява както ситуационната осведоменост, така и дългосрочните възможности за мониторинг за държави и недържавни актьори наравно.

Introduction OSINT and Satellite Imagery

Open-Source Intelligence (OSINT) refers to the systematic collection, processing, and analysis of information derived from publicly accessible sources. OSINT encompasses a wide spectrum of materials, including traditional media, governmental open data, academic literature, and digital content disseminated through the internet and social media platforms [1]. Satellite imagery, in contrast, has traditionally been classified under Imagery Intelligence (IMINT) and Geospatial

Intelligence (GEOINT), involving the acquisition and interpretation of visual or sensor-based data collected from airborne and spaceborne platforms. For much of the twentieth century, satellite imagery intelligence was primarily the preserve of governmental agencies and classified programs, distinctly separated from open information streams.

In recent years, however, the boundary between these domains has become increasingly blurred. The proliferation of commercial satellite constellations and the emergence of advanced analytical technologies have facilitated the integration of satellite imagery within the OSINT discipline. The growing accessibility of high-resolution, cost-effective, and even near–real-time satellite data has transformed open-source analytical capabilities, enabling comprehensive observation of global events without reliance on classified sources.

This convergence of OSINT and GEOINT represents a paradigm shift in contemporary intelligence practice. It allows both state and non-state actors to exploit unclassified satellite imagery for situational awareness, crisis monitoring, and strategic decision-making, thereby democratizing access to geospatial intelligence and redefining traditional notions of secrecy in the intelligence domain. In parallel with the expansion of OSINT, IMINT has followed its own distinctive evolutionary trajectory. The origins of IMINT can be traced back to aerial reconnaissance photography during the First and Second World Wars, when aircraft-based imagery provided critical insights into enemy capabilities and movements. The advent of satellite technology in the mid-twentieth century marked a major turning point in the development of remote sensing and strategic intelligence. The early generation of reconnaissance satellites-most notably the U.S. CORONA program of the 1960s delivered imagery of previously inaccessible or denied territories. However, these capabilities remained highly classified and were restricted to governmental intelligence agencies. For several decades thereafter, satellite-based IMINT was an exclusive domain of the superpowers, employed primarily for strategic surveillance tasks such as monitoring missile installations, military deployments, and other defense-related infrastructure, far removed from public access or transparency.

Institutionally, nations established specialized organizations to manage and exploit imagery intelligence. In the United States, for instance, imagery functions were gradually consolidated into the National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) by the early 2000s, reflecting the growing importance of integrating spatial and visual data for national security purposes. The conceptual framework of Geospatial Intelligence (GEOINT) [2] subsequently emerged to highlight the fusion of imagery and geospatial information for enhanced mapping, situational awareness, and analytical applications. Nevertheless, until the closing years of the twentieth century, access to high-resolution satellite imagery remained tightly restricted, with most data classified or under stringent governmental control.

One of the most significant advancements in recent years has been the rapid improvement in satellite image resolution and collection frequency. Early commercial Earth observation satellites in the early 2000s typically provided imagery with a spatial resolution of approximately one meter and could revisit a specific location only once every several days or even weeks. Contemporary commercial platforms, however, have transformed this landscape. Systems such as Maxar WorldView constellation are now capable of delivering optical imagery with a resolution of up to 30 cm, allowing for the identification of individual vehicles, small buildings, and other fine-scale surface features.

Simultaneously, the emergence of large constellations of small satellites. This unprecedented revisit frequency allows analysts to obtain near-continuous updates on ground-level developments, offering temporal and spatial coverage that would have been inconceivable only two decades ago. The expansion of the satellite imaging industry, driven by declining launch costs, advances in sensor miniaturization, and the rise of private-sector innovation, has dramatically increased the number of active Earth observation platforms. Recent analyses indicate that the total number of operational satellites dedicated to Earth observation has multiplied several-fold over the past five years, largely due to commercial launches. As a result, an extensive temporal archive of imagery now exists, often enabling retrieval of visual data from almost any point on the planet within the preceding 24 hours or even in some cases, even within the past few hours.

For open-source intelligence practitioners, this abundance of high-temporal and very-high-resolution (VHR) imagery represents a transformative capability. Critical global events such as missile launches, natural disasters, or military mobilizationscan be monitored and analyzed in near-real time rather than retrospectively. Recent studies [3] demonstrate how VHR satellite imagery has been employed to document and visualize armed conflicts, including the movement of military assets and the destruction of critical infrastructure shortly after such events occur. This unprecedented timeliness significantly enhances the analytical power of OSINT, enabling rapid verification or refutation of information through direct geospatial observation effectively providing analysts with “eyes in the sky” for real-time situational awareness.

OSINT Methodologies and the Intelligence Cycle

The integration of open-source intelligence (OSINT) with satellite imagery necessitates a robust theoretical foundation that bridges methodologies in intelligence analysis and geospatial science. As satellite-based remote sensing becomes increasingly democratized via open data initiatives and commercial platforms, the ability to extract actionable intelligence from such imagery hinges not only on technical expertise in data processing but also on a nuanced conceptual grasp of how intelligence is systematically structured, generated,and validated.

As defined by NATO and by U.S. intelligence authorities [4], OSINT encompasses publicly and legally obtained information that is systematically validated, analyzed and disseminated to address specific intelligence requirements. The U.S. government definition characterizes OSINT as information collected [5], exploited and disseminated in a timely manner to the appropriate audience for intelligence purposes emphasizing both the legal and open nature of its sources.

OSINT adheres to the classical intelligence cycle [6] comprising the stages of planning and direction, collection, processing and exploitation, analysis and production, and dissemination, while adapting each phase to the unique characteristics of opensource data. Each step of the OSINT workflow places a strong emphasis on the legality, transparency and ethical integrity of information gathering. Unlike covert forms of intelligence such as HUMINT, OSINT practitioners rely exclusively on publicly available sources, however, they employ comparable analytic tradecraft. Analysts must critically assess source reliability, maintain objectivity by countering confirmation bias and subject their conclusions to peer or supervisory review. The intelligence cycle provides a systematic framework ensuring that OSINT activities remain structured, goal-oriented and aligned with decision-making needs.

Every intelligence process begins with structured planning, and OSINT follows the same logic. During this phase, analysts define key intelligence questions, identify information requirements, and translate them into a collection strategy focused on open sources. Tasks may include monitoring military movements or gathering recent satellite imagery of border zones each tied directly to decision-makers needs. Effective OSINT planning also determines which datasets, repositories or platforms will yield the most relevant information while ensuring legal and ethical compliance [7]. Analysts document sources, keywords, and timeframes, creating a structured plan that aligns with laws on data protection and privacy. The outcome is a clear, lawful and goal-oriented framework that directs all subsequent collection efforts.

The Collection phase implements the intelligence plan by systematically gathering raw data from open sources, including media, public databases, satellite imagery, and social networks. Modern OSINT employs automated tools (web crawlers, API queries) alongside manual research to acquire relevant, legally accessible data, while maintaining overt compliance and avoiding unauthorized access. To combat data overload, analysts prioritize high-value sources, for example, Copernicus imagery or AIS data for military tasks, or extremist forums and regional media for terrorism analysis. Through filtering and prioritization, this phase yields targeted raw datasets for subsequent processing. In the Processing phase, raw OSINT data is refined into structured, analysis-ready formats via cleaning, deduplication, standardization, translation, and metadata tagging. Tools like OCR enable text extraction, while translation systems ensure linguistic accessibility. Given the prevalence of noise and misinformation in open data, this stage is essential for upholding reliability and integrity. Additional steps, such as geolocation, time-tagging, GIS integration, image calibration, enhancement, and change detection, convert visuals into actionable GEOINT [8], resulting in a coherent, validated dataset organized chronologically and thematically. The Analysis and Production phase forms the interpretive core of OSINT, where analysts assess source reliability and information accuracy through cross-validation across independent sources to counter misinformation. Employing pattern recognition, spatio-temporal analysis and data correlation [9], they uncover trends and anomalies, with machine learning aiding in insight generation but human judgment remaining pivotal. The outcome is a validated OSINT report that delivers evidence-based conclusions addressing the initial intelligence requirements.

Observing China military modernization using OSINT and GEOINT

China’s rapid military modernization over the past decade has increasingly come into focus through the combined application of OSINT and GEOINT. Unlike traditional classified intelligence, OSINT-GEOINT relies on publicly available data ranging from commercial satellite imagery to open online sources to monitor developments [10] within the People’s Liberation Army (PLA). While many aspects of China’s defense expansion remain opaque, high-resolution optical and radar satellite imagery, combined with open-source data analytics, has provided unprecedented insight into the scope and pace of Beijing’s military advances. Notably, several key discoveries about the PLA’s evolving capabilities have originated not from government intelligence agencies but from independent

researchers employing tools such as Google Earth, Sentinel imagery and commercial satellite constellations. These findings have rendered previously hidden developments such as the construction of new missile silo fields, naval bases, and stealth aircraft production facilities visible to the global analytical community.

Among the most revealing aspects of this modernization is the expansion of the PLA Rocket Force (PLARF), responsible for China's land-based ballistic and cruise missile arsenal. Open-source satellite monitoring has enabled analysts to document the proliferation of missile brigades, new launch systems, and extensive silo construction across the country. Over the past decade, China has roughly doubled the number of operational missile brigades while introducing new dual-capable conventional nuclear platforms and hypersonic glide vehicles, signaling both quantitative and qualitative improvements in strategic capability [11]. This section examines two principal trends – the buildup of conventional missile brigades and intermediate-range systems and the emergence of fixed missile infrastructure, particularly silo fields for intercontinental ballistic missiles (ICBMs), as identified through open-source satellite observation.

Although the overall launcher count has remained relatively stable since 2022, major construction projects are transforming key PLARF facilities. A notable example is the redevelopment of the 611th Brigade compound (30.6903° N, 117.9011° E) near Rongcheng, east of Chizhou in Anhui Province. President Xi Jinping inspected this site in October 2024, where he was briefed on the unit's modernization and observed training with the DF-26 intermediate-range ballistic missile, which has replaced the older DF-21A system since 2021. Satellite imagery from 2024–2025 reveals that an extensive redevelopment program initiated in 2023 is nearing completion, transforming the complex into a purpose-built DF-26 base – a configuration unprecedented among known PLARF facilities (Kristensen et al. 2025) (Figure 1).

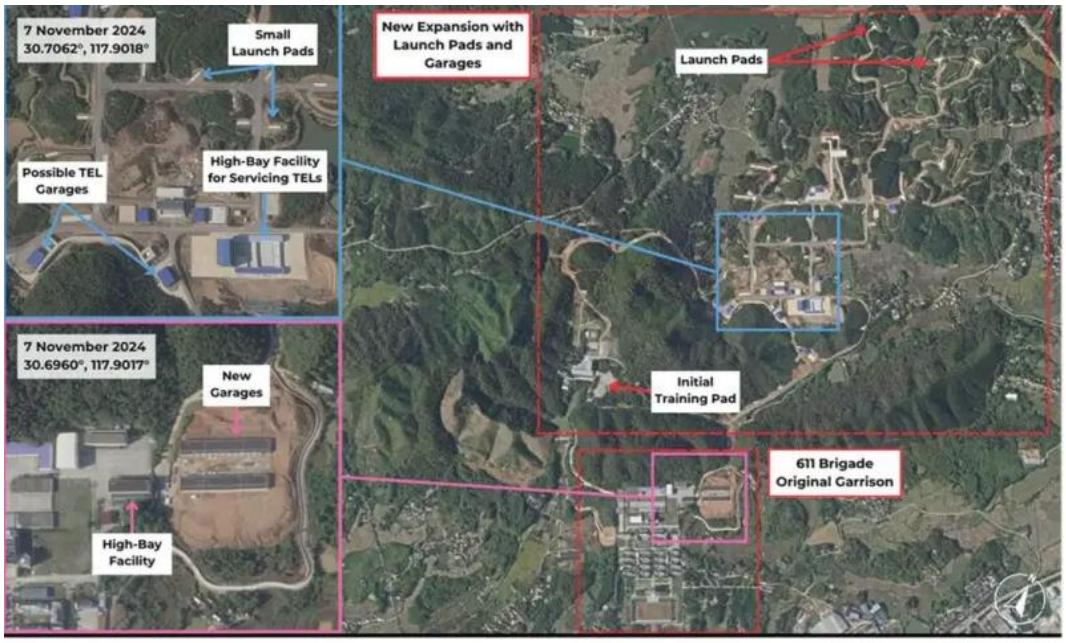


Fig. 1. 611 Brigade near Chizhou [12]

China's modernization of the PLARF extends well beyond the 611th Brigade in Anhui. A broader series of garrisons is being reshaped to accommodate the DF-26 IRBM (Biggers 2024), facilitating deployment across China's northwestern regions (Figures 2 and 3). One of the most visible indicators of this expansion was observed at the 642nd Brigade's training grounds near Datong, Qinghai, where commercial satellite imagery from March 2022 captured roughly two dozen DF-26 TELs positioned along newly constructed firing pads tracing a mountain valley west of Changwu. Analysts believe these launchers were deployed for advanced field exercises at Base 64's missile school near Xining before reassignment to permanent bases elsewhere.

That permanent base is now widely assessed to be the 647th Brigade compound under construction approximately 240 km north-northwest of Datong, near Zhangye. The garrison's twin semicircular berms and 12 drive-through garages per arc appear purpose-built for a 24-launcher DF-26 unit the same formation observed at Datong strongly suggesting an imminent relocation upon completion. With Zhangye operational, PLARF will field eight DF-26 brigades, though open-source assessments indicate that only a fraction of the roughly 250 launchers are equipped with nuclear

payloads. Approximately 100 nuclear warheads are believed assigned, given that the missile exists in three primary variants, including a conventional-only anti-ship model.

The 646th Brigade at Korla exemplifies Beijing's emerging "swing-role" philosophy, training to conduct both conventional and nuclear missions. Crews reportedly practice rapid in-field warhead exchanges without removing the missile from its launcher. While this flexibility supports China's doctrine of escalation control and deterrence versatility, it introduces serious crisis-management challenges: adversaries monitoring satellite imagery cannot discern whether a launcher [13] is armed with a conventional or nuclear warhead, thereby increasing the risk of misinterpretation.

Fig. 2. DF-31AG on the road are within the boundaries of new military training zone

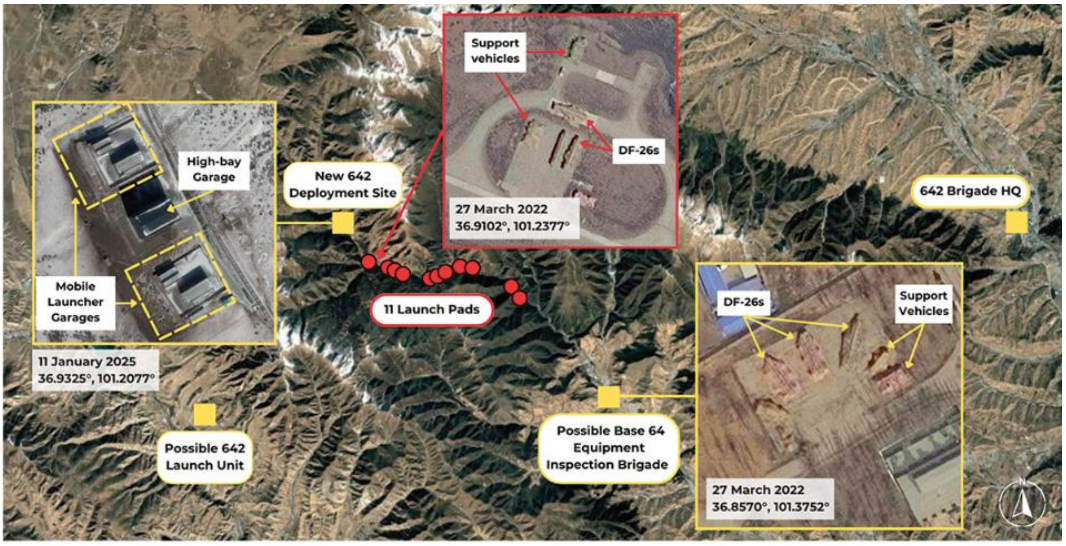


Fig. 3. DF-26 launchers and DF-31AG missile infrastructure [14]

The Pentagon's 2024 China Military Power Report identifies the DF-26 as "the most likely weapon system to field a lower-yield warhead in the near term," a view reinforced by U.S. Strategic Command's 2025 testimony, which highlights China's investment in precision, theater-range systems. Meanwhile, earlier speculation that the DF-17 hypersonic-glide missile might adopt a nuclear role has faded - recent U.S. reports classify it solely as conventional, and the older DF-21A medium-range ballistic missile has been omitted from the latest nuclear inventories. Collectively, the Datong exercise, the near-complete Zhangye garrison, and U.S. assessments of lower-yield developments underscore the DF-26's emergence as the PLARF's principal theater-range platform, a dual-capable system that blurs the line between conventional deterrence and nuclear signaling across the western Pacific.

Conclusion

By combining open-access satellite imagery with systematic intelligence analysis, researchers can now detect and assess key military trends from infrastructure expansion and missile deployments to organizational reforms—using purely public data.

The case study of the PLARF illustrates how multi-temporal satellite monitoring enables accurate identification of new missile garrisons, launcher deployments, and doctrinal shifts. The observed proliferation of DF-26 intermediate-range ballistic missiles and the construction of new facilities, such as those in Anhui and Zhangye, demonstrate both the scale and sophistication of China's evolving strategic capabilities. More importantly, these findings highlight how geospatial intelligence can reveal not only physical changes but also deeper strategic intentions, such as Beijing's move toward dual-capable and rapid-response systems.

Ultimately, this research underscores the growing analytical power and strategic value of satellite-based intelligence. The democratization of high-resolution imagery and advanced analytic tools allows state and non-state actors alike to enhance situational awareness, verify information independently, and contribute to transparency in global security affairs. As the accessibility and precision of satellite data continue to expand, OSINT–GEOINT fusion will remain an essential methodology for monitoring military modernization, supporting informed policymaking, and strengthening the broader framework of international stability and arms control.

References:

1. Colquhoun, C. A brief history of open-source intelligence. Bellingcat, 2016-07-14. Available online at: https://web.archive.org/web/20250627035723/https://www.bellingcat.com/resources/articles/2016/07/14/a-brief-history-of-open-source-intelligence/
2. Van Wyk, J. Pixels, politics and peace: the forensic use of satellite imagery. Journal of African Foreign Affairs, 6(2), 31–50, 2019. Available online at: https://www.jstor.org/stable/26798960
3. Bennett, M. M., et al. Improving satellite monitoring of armed conflicts. Earth's Future, 10(9), e2022EF002904, 2022. https://doi.org/10.1029/2022EF002904
4. Office of the Director of National Intelligence and Central Intelligence Agency, Intelligence Community OSINT Strategy 2024–2026. Washington, DC, 2024. Available online at: https://web.archive.org/web/20250627040237/https://www.dni.gov/index.php/newsroom/reports-publications/reports-publications-2024/3785-the-ic-osintstrategy-2024-2026
5. Nikolov, B. and D. Nikolov. A scenario-based approach to cybersecurity training for seafarers. In: Proceedings of the 24th International Association of Maritime Universities (IAMU) Conference, Massachusetts Maritime Academy, United States, 2024, pp. 385–390. ISSN: 2706-6762
6. Adams, S. The intelligence cycle: generating OSINT from OSINF. Skopenow Blog, 2022-03-25. Available online at: https://web.archive.org/web/20250627035434/https://www.skopenow.com/news/the-intelligence-cycle-creating-osint-from-osinf
7. Pedram, M., et al. When open-source information backfires: satellite imagery and privacy breaches. Vanderbilt Journal of Transnational Law, 58(1), 119–156, 2025
8. Sutherland, M. The augmentative effect of AI in the OSINT cycle. The Security Distillery, 2021-07-17. Available online at: https://web.archive.org/web/20250627035919/https://thesecuritydistillery.org/all-articles/the-augmentative-effect-of-ai-in-the-open-source-intelligence-cycle
9. Dimitrov, I. et al. Design and implement an automatic smart buoy system for Bulgarian safe beach areas – Part 1. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 19(2), 381–386, 2025. https://doi.org/10.12716/1001.19.02.05
10. Colonna Vilasi, A. The intelligence cycle. Open Journal of Political Science, 8, 35–46, 2018. https://doi.org/10.4236/ojps.2018.81003
11. Zhu, Z., et al. Benefits of the free and open Landsat data policy. Remote Sensing of Environment, 224, 382–385, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.001
12. Kristensen, H. M., et al. Chinese nuclear weapons, 2025. Bulletin of the Atomic Scientists, 2025-03-12. Available online at: https://web.archive.org/web/20250627060903/https://thebulletin.org/premium/2025-03/chinese-nuclear-weapons-2025/
13. Biggers, C. China expands DF-26 launcher inventory. Janes, 2024-10-25. Available online at: https://web.archive.org/web/20250627035558/https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/defence/china-expands-df-26-launcher-inventory
14. Kristensen, H. M., et al. Chinese nuclear weapons, 2024. Bulletin of the Atomic Scientists, 80(1), 49–72, 2024. https://doi.org/10.1080/00963402.2023.2295206

ОТРАЖЕНИЕТО НА ПРИРОДНИТЕ БЕДСТВИЯ В ХУДОЖЕСТВЕНОТО ТВОРЧЕСТВО

Гаро Мардиросян[1], Ваня Иванова[2]

[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
[2]Институт за етнология и фолклористика с етнографски музей – Българска академия на науките
e-mail: garo.mardirossian@gmail.com; vanya.ivanova@iefem.bas.bg

Ключови думи: *природни бедствия, земетресения, наводнения, художествена литература*

Резюме: *Освен хилядите страници в стотици научни и научнопопулярни произведения от векове насам, природните бедствия са обект и на художественото творчество, а именно литературата, изобразителното изкуство, киното и музикалните произведения. По-специално в литературата природните катаклизми широко са представени като фон, двигател на сюжета или главна тема, използвайки ги за изследване на човешката природа, преживявания и взаимодействие със силата на природата. В настоящата статия накратко са разгледани характерни примери за отразяване на природни бедствия – земетресения, наводнения, свличания на лавини, снежни бури, цунами и др. в художественото литературно творчество. Независимо че в някои от тях има доста детайлно описание на природни бедствия, тук не се засягат митове и легенди.*

THE REFLECTION OF NATURAL DISASTERS IN ARTISTIC CREATIVITY

Garo Mardirossian[1], Vanya Ivanova[2]

[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
[2]Institute of Ethnology and Folklore Studies with Ethnographic Museum – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: garo.mardirossian@gmail.com; vanya.ivanova@iefem.bas.bg

Keywords: *natural disasters, earthquakes, floods, literature, fiction*

Abstract: *In addition to thousands of pages in hundreds of scientific and popular science works for centuries, natural disasters are also the subject of artistic creation, namely literature, fine arts, cinema, and musical works. n literature, in particular, natural disasters are widely presented as a backdrop, plot driver, or main theme, using them to explore human nature, experiences, and interaction with the power of nature. This article briefly examines typical examples of the depiction of natural disasters – earthquakes, floods, avalanches, snowstorms, tsunamis, etc. in literary works. Although some of them contain quite detailed descriptions of natural disasters, myths and legends are not touched upon here.*

Въведение

През цялата си история човешката цивилизация е съпътствана от природни бедствия. Милиони загинали, неизчислими материални щети, неописуемо човешко страдание и мъка. Тези гневни изблици на нашата планета оставят трайни следи в съзнанието и паметта на хората, които се предават от поколение на поколение. Освен многото хиляди страници в стотици научни и научнопопулярни произведения от векове насам, природните бедствия са обект и на художественото творчество, а именно литературата, изобразителното изкуство, киното и музикалните произведения. По-специално в литературата природните катаклизми широко са представени като фон, двигател на сюжета или главна тема, използвайки ги за изследване на човешката природа, преживявания и взаимодействие със силата на природата.

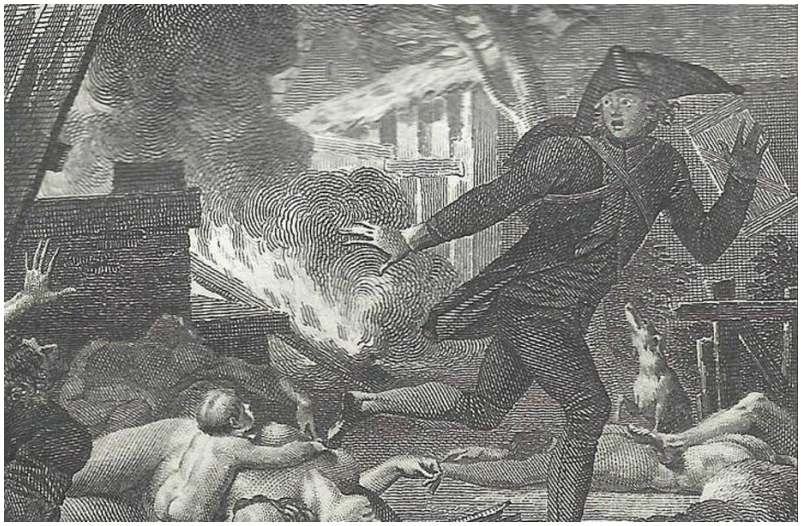
Тук ще се спрем на някои характерни примери за отразяване на природни бедствия от автори на художествени литературни произведения. Няма да се засягат митовете и легендите,

независимо че в някои от тях доста детайлно са описани тези бедствия. Също няма да се споменават и анализират съвременни научно-фантастични творби, преди всичко филми.

Избираме да се спрем на някои произведения, които описват реални бедствени събития от XVIII век насам в световен план. В прегледа си, който съвсем не претендира за изчерпателност, а по-скоро да отвори врата към темата, приемаме общоприетата класификация при изреждането на природните бедствия. Така текстът проследява първо земетресения, послужили за централна тема или контекстуален фон на художествени произведения, след това се спира на наводненията, като ще маркира споменаването и на други природни бедствия като циклони, цунами, лавини, мълнии, бури, пожари и други. Целта на този преглед е да отрази както класически литературни произведения, които използват бедствията като част от сюжета си и са написани в епохата на случването им (например, Лисабонското земетресение от 1755 г.), така и как тези природни стихии намират отзвук в съвременни произведения от XX и XXI век.

Земетресения в художествената литература

Едно характерно художествено описание на земетресение се съдържа в книгата „Кандид“ на Волтер. „Кандид, или оптимизмът“ (1759) в която се пресъздава *Лисабонското земетресение от 1 ноември 1755 г.*, унищожило по-голямата част от Лисабон – десетки хиляди са жертвите, като следват пожар и цунами. Събитието шокира цяла Европа и става център на дебата за Божията справедливост и смисъла на злото. Произведението, което създава Волтер, отразява земетресението не само като природно бедствие, а с философски и сатиричен поглед. В романа авторът поставя героите си в самия епицентър на бедствието, за да покаже колко нелепо звучи философията, че *„всичко е за най-доброто“.* Цитатът от V-та глава: *„Едва бяха влезли в града, оплаквайки смъртта на своя благодетел, и те усетиха, че земята се затресе под краката им. Кипящото море заля пристанището и разби корабите, които бяха на котва. Вихрушки от пламъци и пепел изпълниха улиците и градските площади, къщите се сриваха, покривите рухваха върху основите, а самите основи се рушаха. Тридесет хиляди жители от двата пола и от всички възрасти бяха смазани под развалините.“* Волтер описва сцените с голям реализъм и без поетизация.



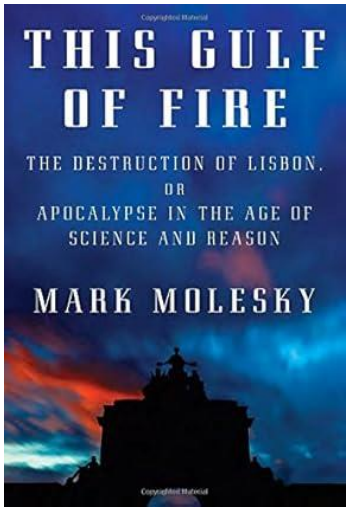
Фиг. 1. Илюстрацията към книгата на Волтер „Кандид“

През последните десетилетия няколко писатели се връщат към земетресението в Лисабон не само като символ, но и чрез въздействащи описания на самото събитие.

Един от тях е американският историк Марк Молески (Mark Molesky, This Gulf of Fire: The Destruction of Lisbon, or Apocalypse in the Age of Science and Reason, 2015). Книгата е историческо изследване, написано в стил, близък до историческия наратив. Разказва за земетресението в Лисабон, за цунамито и пожара, които унищожават града, и за последиците — социални, философски и политически. Молески използва дневници, писма, дипломатически доклади и свидетелства на очевидци, за да създаде живо описание.

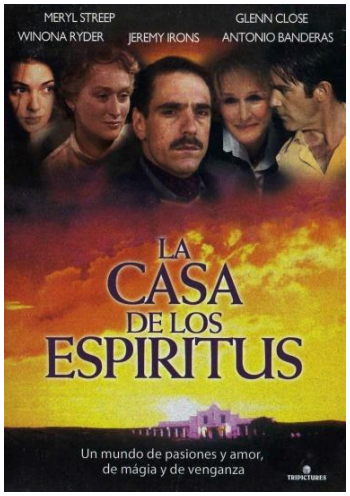
„…голям облак прах обгърна града. Изхвърлен във въздуха от удара и сътресението на срутващите се сгради, прахът потопи Лисабон в нещо, което един очевидец описа като „египетска тъмнина...“.

След няколко минути прахът започна да се утаява и слънцето проникна през сивата мъгла. „Изминахме близо две мили по улиците“, пише един очевидец на този нов Лисабон, „прескачайки руините на църкви, къщи и стъпвайки върху стотици мъртви и умиращи хора, убити от падащите сгради...“ (стр. 89).



Фиг. 2. Книгата на Марк Молески

Чилийската писателка Исабел Алиенде детайлно описва в първия си и най-известен роман „Къщата на духовете“ (1982) земетресение, случило се в Чили в средата на XX-ти век, без да реферира към конкретно събитие, но с големи подробности и характеристики на случилото се. Разрушителното бедствие е смесено с емоционалните и духовни преживявания на героите, което е характерно за стила на Алиенде.



Фиг. 3. „Къщата на духовете“

„Бедствието започна в четири часа през нощта. Клара се събуди малко по-рано от апокалиптичен кошмар, в който имаше разкъсани коне, отнесени от морето крави, изпълзяващи изпод камъните хора и зейнали в земята пропасти, в които се сриваха цели къщи. Мъртвешки бледа от ужас, тя стана и изтича до стаята на Бланка. ....

Точно в този миг започна земетресението. Клара усети, че земята се разтресе, и не можа да се задържи на крака. Падна на колене. Керемидите се откъснаха от покрива и се посипаха наоколо с оглушително гърмолене. Видя как кирпичената стена на къщата се разчупи на две, сякаш я бяха разсекли с брадва, земята се разтвори, както тя беше виждала в сънищата си, и пред нея зейна огромна пукнатина, в която се сринаха един след друг курниците, коритата за пране и част от обора. Водният резервоар се кандилна, сгромоляса се и изсипа хиляда литра вода върху оцелелите кокошки, които пръхаха отчаяно. В далечината вулканът бълваше огън и пушек като разгневен дракон. Кучетата се откъснаха от веригите и се разбягаха влудени, конете от несрутената част на обора издуваха

ноздри, душеха въздуха, цвилеха от ужас и току се втурваха в необуздан бяг към открито поле, тополите се заклатиха като пияни, няколко се строполиха с оголени коренища и премазаха гнездата на врабците. А най-страшното беше оня рев, излязъл от вдън земя, онова изпъхтяване на великан, което отекна задълго и изпълни въздуха с ужас. Клара викаше Бланка и се опитваше да се добере до къщата, но предсмъртните хрипове на земята й попречиха. Видя как селяните наизлязоха уплашени от къщите си, призоваваха небето на помощ, прегръщаха се един друг, дърпаха децата, ритаха кучетата, блъскаха старците и се мъчеха да спасят жалките си партакеши сред грохота на тухли и керемиди, които изригваха от самите недра на земята като безкрайно гъргорене, сякаш бе настъпил свършекът на света. В същия миг, когато Естебан Труеба се появи на прага, къщата се разцепи като яйчена черупка, срина се в облак прах и го смаза под планина отломки. Клара допълзя дотам, вика го, крещя, ала никой не й отвърна.

Изтръшка на земята кажи-речи де що имаше, а каквото не успя, бе повалено от броеницата по-слаби трусове, която продължи да раздрусва света, докато съмна. В „Трите Марии“ изчакаха да изгрее слънцето, за да преброят умрелите и да изровят погребаните под развалините, които още стенеха. Сред тях беше и Естебан Труеба, всички знаеха къде е, ала никой не хранеше надежда, че ще го извадят жив. Четирима мъже под командването на Педро Втори се заловиха да разриват могилата от прахоляк, цигли и кирпич, която го покриваше. Клара бе изоставила ангелската си разсеяност и помагаше с мъжка сила да разчистват камъните.

— Трябва да го извадим! Жив е и ни чува! — твърдеше Клара и това ги насърчаваше да продължат“. (стр. 157–159)

Сега след Португалия и Чили, се преместваме в Япония.

Земетресението в Кобе на 17 януари 1995 г. е един от най-дълбоките и символични мотиви в творчеството на японския писател Харуки Мураками. Той не го описва като хроникьор на събитията, а като вътрешно, духовно сътресение, което променя съдбата и съзнанието на героите му. Най-ясно това се вижда в сборника с разкази: „След труса“ (*After the Quake*, 1999). Земетресението в Кобе е едно от най-разрушителните в съвременната японска история с над 6 хиляди жертви. Малко след това на 20 март 1995 г. се случва и атентатът със зарин в токийското метро — две трагедии, които разклащат японското общество. Мураками пише *„След труса“* като реакция на тази „разклатена Япония“, където хората изгубват не само домовете си, но и чувството си за сигурност, идентичност и близост.

„Супер жаба спасява Токио“ (*Super-Frog Saves Tokyo*) е най-емблематичният разказ от сборника. Огромна говореща жаба се явява на обикновен банков чиновник, за да го убеди да спасят Токио от червей, който се готви да предизвика земетресение. Жабата е метафора на вътрешната съвест, на желанието да се направи добро в един разклатен свят. Земетресението тук не е просто природно явление, а духовен катаклизъм — продукт на натрупаните страдания и морален упадък. Мураками използва земетресението като алегория за колективната травма — физическото разклащане на земята става огледало на духовното разклащане на хората.

Наводнения в художествената литература

В „Медният конник“ (1833) се разказва за друго катастрофално природно събитие: *наводнението в Петербург през ноември 1824 г.,* когато градът е залят от водите на Нева, разрушени са домове, има стотици жертви. Руският поет, драматург, историк, белетрист и публицист Александър Пушкин пише поемата около десет години по-късно. Описанието на наводнението е едно от най-мощните природни видения в руската литература. Пушкин използва динамичен, визуален, почти кинематографичен стил – буря, вятър, вода, хаос. Тук природата е одушевена – реката се държи като живо същество, „болно“ и „възмутено“. Водата е не просто стихия, а сляпа, разрушителна сила, срещу която човекът е безпомощен:

„И ето — под страшния натиск Нева се изду като болен,
подигна се тежка вълна и нахлу върху града си.“

Главният герой Евгений (обикновен човек, чиновник) губи любимата си и разсъдъка си по време на наводнението. Той стои на брега, вижда разрушението и разбира своята пълна нищожност пред силите на природата и властта. Наводнението разклаща не само града, но и човешкия свят, съзнанието, душата.

„Всичко загина! — навред, като озверяла,
водата рушеше и влачеше всичко;
и изведнъж, като небесен поглед,
над него заблестя златният кръст...“

Фиг. 4. Илюстрация към „Медният конник“ (Илюстрация на Бенуа)

В творчеството на великия немски поет и натуралист Йохан Волфганг фон Гьоте природните бедствия имат символичен, философски и естетически смисъл, а не само документален или катастрофален. Те често отразяват вътрешни конфликти, морални кризи и космически закони. Във „Фауст“ (1808, 1832), могат да се прочетат описания на пламъци, гръмотевици, бури, потоп. Често те са метафора на вътрешния хаос на героя. Природата надвива човека и демонстрира неговата ограниченост и морална отговорност.

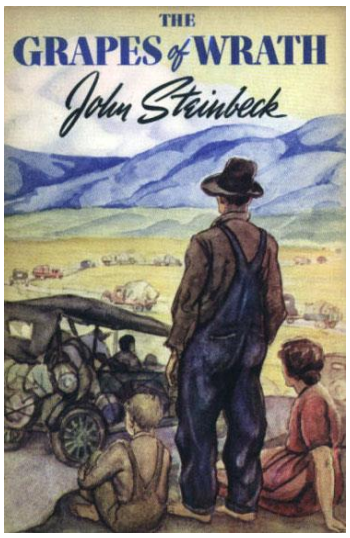
Американският писател и журналист Марк Твен описва различни природни бедствия (наводнения, пустинни, пясъчни, снежни бури, и др.)

В „Живот по Мисисипи“ (Life on the Mississippi, 1883) разказва за наводненията на река Мисисипи. Това е полудокументална книга, смесваща мемоари, пътепис и есе. Твен описва големите наводнения по Мисисипи, които унищожават градове и животи. Той сам е бил речен лоцман, така че наблюденията му са от първа ръка. *„Мисисипи е могъща, но своенравна река — една сутрин те люлее с песен, а вечерта отнася дома ти като клечка.“* Наводненията са реалистично и емпатично описани, но и иронични. Твен често отбелязва колко наивно хората се опитват да „укротят реката“.

„Приключенията на Хъкълбери Фин“ (Adventures of Huckleberry Finn, 1884) също разказва за наводнението по река Мисисипи. Макар наводнението да е част от приключенския сюжет, то е реалистично пресъздадено.

„Десет-дванайсет дни реката все прииждаше и накрай се разля извън бреговете. По ниските места на острова и по брега на Илиноис водата беше до три-четири стъпки дълбока. Откъм нашата страна беше няколко мили широка, а откъм Мисури си беше колкото и досега — половин миля, защото брегът на Мисури беше стена от високи канари“. (Глава 9).

В „Гроздовете на гнева“ (1939) на американския писател, драматург и есеист Джон Стайнбек има няколко епизода, които описват природни бедствия, като в първата част на романа са описани картини на суша и пясъчни бури, засягащи централните щати на САЩ през 1930-те години. Тези пясъчни бури са реални исторически събития, причинени от комбинация на сухи години, ерозия на почвата и неправилна селскостопанска практика. Стайнбек описва как семейството Джоуд се бори за оцеляване, изгубената реколта, мръсния въздух, гъстия прах и бедността. В последните глави на „Гроздовете на гнева“ Стайнбек описва подробно наводненията и дъждове, които преживяват главните герои на романа. Бедствието е едновременно реално и художествено преувеличено – за да се подчертае драмата на семейството и на американските фермери през 1930-те.



Фиг. 5. Корица на книгата „Гроздовете на гнева“

„А когато водата се разля навсякъде, мъжете излязоха на дъжда с лопати и направиха малки вадички около палатките. Дъждът плющеше по брезента и накрая го накваси толкова, че дъждовните струйки затекоха вътре. После дъждът развали вадичките, водата навлезе в палатките и намокри дюшеците и одеялата. Хората седяха с мокри дрехи. Те редяха сандъците един върху друг и слагаха между тях дъски. И седяха на тези дъски ден и нощ.

Край палатките стояха стари автомобили и водата направи негодни магнетитe им, карбураторите. Малките сиви палатки бяха заобиколени от езера. И накрая хората решиха, че трябва да се махат оттук. Но моторите не се запалваха, защото проводниците бяха овлажнели; а тези, чиито мотори още работеха, затъваха в дълбоката кал. И хората цапаха из водата, носейки мокрите си одеяла. Те вървяха, понесли на ръце децата и най-старите. И плевниците по по-високите места бяха претъпкани с хора — треперещи, отчаяни.

А дъждът упорито шибаше земята и водата заливаше пътищата, защото отводнителните тръби вече не можеха да я отвеждат. И тогава от палатките, от претъпканите плевници почнаха да излизат мокри до кости хора, със скъсани дрехи и безформени от полепналата кал обувки. Те тръгваха, цапайки из водата, към градовете, към селските дюкяни, към комисиите по отпускане на помощ — отиваха да изпросят къшей хляб, да изпросят помощ, да откраднат, ако успеят, да излъжат. А тези молби и унижения разпалваха в тях пламъка на безплодния гняв. И в малките градчета съжалението към мокрите до кости хора се сменяше с гняв, а гневът, който предизвикваха гладните, се сменяше със страх от тях”. (стр. 524–525).

В творчеството на Максим Горки природните и социални бедствия се използват както за драматичен ефект, така и за социална критика. Той не се съсредоточава върху реални природни катастрофи толкова, колкото върху страданията на народа, бедността и несправедливостта, но има и конкретни природни стихии. В *„Мать“* и други разкази се срещат силни дъждове и наводнения, които засилват драмата на героите. Природата е сурова, но винаги се свързва с борбата на човека за оцеляване. В *„Детство“* и *„В людях“* Горки описва студове и снегове, които тежко засягат бедните работници и селяни. Зимата е бедствие, защото подчертава уязвимостта на слабите.

Цунами

Романът „Цунами“ на руския писател Николай Задорнове историческа книга, посветена на първата руска дипломатическа експедиция до Япония през 1854 г. под командването на адмирал Путятин. Той разказва за трудностите при установяване на търговски и дипломатически отношения, сблъсъка на интереси с други световни сили и как руските моряци намират подслон на японския бряг след унищожително цунами, въпреки строгите забрани.

“В храма влезе момче, поклони се и каза с висок глас:
– Идва цунами!
Хората по улиците тичаха мълчаливо, като един поток.

– Какво се случи? Цунами? Идва цунами? – попита Кога един старец, който носеше две момичета на ръце.

Той продължи да тича, без да отговаря. Никой не отговаряше. Внезапен вятър разпали пламъците на пожарите, от града се носеше дим, чуваше се трясъкът на сухо дърво. Каменните фенери се разпаднаха и лежаха до храма, каменният мост над езерцето в градината се счупи и се разцепи на две.

„Никога досега не е имало толкова силно земетресение“, каза треперещ свещеникът, стопанинът на храма.

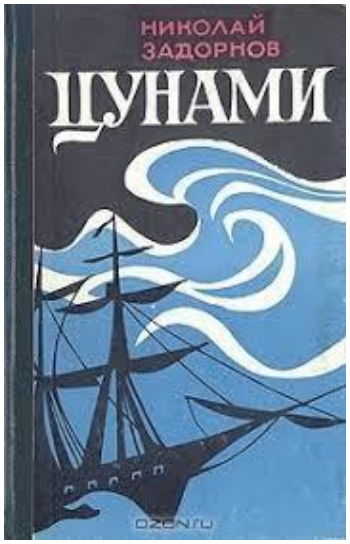
Кога го помоли да отиде до брега, за да види дали наистина идва цунами.

„Водата в морето ми се струва напълно спокойна. Това са високи, вертикални трусове“, отговори стопанинът на храма, без да мърда от мястото си.

Най-смелите мъже се взираха във водата, стоящи на каменистия бряг или на борда на лодките си. Кога знаеше, че те гледат дали не е дошла рибата нумазу; ако има цунами, рибата нумазу веднага се появява край брега, шуми и скача. Лодките на повърхността на залива бързаха към изхода към океана.

– Няма цунами, хората се страхуват от пожар – каза един от самураите.

„Но няма никакви признаци за цунами!“ – помисли си Кога.



Фиг. 6. Корица на романа „Цунами“

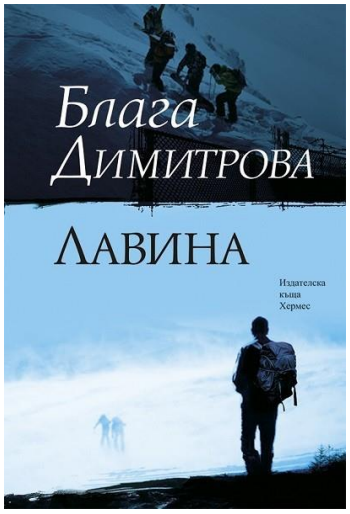
Изведнъж той видя как Каваджи скочи от храма на съседния хълм. Той беше много силен, свикнал с упражненията с меч. Един от неговите самураи се закачи за терасата и падна, но веднага се изправи и всички бързо се качиха на хълма. Накамура Тамея и слугите му изнасяха някакви вещи от храма. Каваджи, като планински тигър, започна бързо да скача от скала на скала. Лодките на повърхността на залива затанцуваха. Вълна нахлу в града. Кога грабна халата, събу обувките си и бос се затича с всички сили далеч от града. Тичаше толкова бързо, колкото отдавна не беше тичал. Цялата тълпа от неговите подчинени се втурна след него. В подножието на планината Дайандзисан слугите го хванаха отстрани и отзад и го понесеха. Той вече беше между скалите. Бодливите храсти разкъсаха ръцете и глезените му до кръв.Кога, държайки се за клона на бор, погледна надолу от високата скала. Черна дим се разстилаше над града. Като мъртви в огъня, се изправяха и сами се издухаха сгънатите платна от лодки и кораби, които по някаква причина бяха изнесени на улиците. Наблизо, почти по ръба на пропастта, жени и деца вървяха с кутии, четейки молитви. Градът започна да се покрива със синя прах, като дъжд. От планината Дайандзисан всичко се виждаше като в театър. Отгоре по планината се търкаляха с трясък камъни и хората се разбягваха, като ги виждаха...”.

Едно от най-катастрофалните цунами в човешката история е описана в „Цунами" – втория роман на поета и прозаика Глеб Шулпяков. Млада двойка, актриса и драматург се отправят на пътешествие в Тайланд. Но нея я извикват в Москва за дългоочаквана репетиция на нова пиеса, Той остава в епицентъра на катастрофата, когато в края на 2004 г. връхлита страшното цунами.

Лавини

Романът „Лавина“ (1971) на българската писателка, поетеса и литературна критика Блага Димитрова е произведение, което изследва психологическите и социални аспекти на човешкото съществуване, като разказва за група алпинисти, част от които загиват в планината.

„Пада, пада. Сняг върху сняг.
Всичко засипва. Изчезват скали и дървета, пътеки и урви. Сякаш никога не ги е имало. Дори формите им се изгубват. Сняг навсякъде.
На утрото осъмвам на друга планета. Бяла, заоблена, тиха. Още неизследвана.
Забравям къде е било земя, къде камък, къде пропаст. Всичко се изравнява.
Ръбовете изчезват. Ъглите се заглаждат. Пъстротата се стопява.
Крясъкът на боите заглъхва.
Нямо безбагрие.
Вали бяла забрава.“



Фиг. 7. Корица на романа „Лавина“

В редица произведения и на български автори се описват природни бедствия, като земетресения, наводнения, пожари и епидемии. Те често се използват не само като фон, но и като символ на съдбата, морални или социални изпитания. Такива примери се срещат в разказите на Елин Пелин, Йордан Йовков, в творчеството на Иван Вазов, Димитър Талев и други.

Заключение

Настоящата статия е само бегла илюстрация на отражението на някои от основните природни бедствия в художественото литературно творчество – проза и поезия. Освен в такова творчество стотици произведения на изобразителното изкуство са посветени на бурите. На първо място трябва да спомена картините на руският художник от арменски произход Иван Айвазовски, известният венециански художник Джорджоне да Кастелфранко, англичаните Уилям Ешфорд и Джордж Марленд, руските художници Фьодор Василиев, Канстантин Маковски, Виктор Ботурин и други. В стотици хиляди картини на художници въздействащо са отразени мълнии – големият холандски художник Винсент ван Гог, руснакът Максим Воробев и други. Картината „Цунами“ на японския художник Хукасай стана символ на това природно бедствие. Природни бедствия са в основата на сюжетната линия и на редица музикални произведения.

От зората на човешката цивилизация и до ден днешен природните бедствия я съпътстват и са неминуема част от живота на човешкото общество. И затова е нормално, въпреки трагизма от огромните човешки жертви и материални загуби, те да присъстват и в художествените произведения.

THE SUDEM APPROACH: ADVANCED AIR MOBILITY EMERGENCY OPERATIONS BASED ON FUTURE ADVANCED COMMUNICATION SYSTEMS – AS CRUCIAL ELEMENTS OF A SYSTEM OF SYSTEMS FOR EFFECTIVE DISASTER MANAGEMENT

Georgi Georgiev[1], Mehmet Akşit[2], Dimo Zafirov[3], Petar Lulchev[1], Axel Sikora[4], Lechosław Tomaszewski[5]

[1]Dr. Georgiev Consulting GmbH
[2]Composite Information Technologies B.V., Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)
[3]Space Research and Technology Institute - Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS)
[4]Hochschule Offenburg
[5]Orange Polska
e-mail: georgi@georgiev-consulting.de

Keywords: *Disaster management, digitalisation, foresight, Advanced Air Mobility, System of Systems, Advanced Communication Systems, stakeholders, Unmanned Aerial Systems, education models*

Abstract: *During the last 150 years the average temperature of the Earth's atmosphere has increased by 1,3 °C, leading to a significant increase in extreme environmental events and disasters in our densely populated areas. In addition, anthropogenic disasters from large-scale accidents or warfare are on an unfortunate rise.*

The ERASMUS+ project SUDEM (2023-1-BG01-KA220-HED-000159479) is establishing and validating a novel interdisciplinary higher education knowledge transfer model and curriculum, with focus on the digitalisation of the overall disaster and emergency handling lifecycle. The international team embeds principles of practice and education from all relevant domains, incl. risk and disaster monitoring and management, decision-making support, AI, IoT, Data Science, remote sensing (satellites and drones) and data fusion, data management.

The project unites a consortium of leading European Higher Education and Research organisations, leveraging international collaboration to align academic programs with the demands of the optimal disaster management, incl. the decision-making support. SUDEM emphasises creating adaptable and accessible educational modules that can be implemented across diverse Higher Education and Life-Long Learning organisations.

This paper represents the results of the SUDEM Foresight study – a core project methodology element, enabling the elaboration and delivery of an efficient response to the identified demands and challenges, potential solutions, a relevant system architecture, and an optimal future development scenario incl. education, process management, policy, and finally a unique knowledge and training package as a core project result.

ПОДХОДЪТ SUDEM: АВАРИЙНИ ОПЕРАЦИИ С МОДЕРНА ВЪЗДУШНА МОБИЛНОСТ, БАЗИРАНИ НА БЪДЕЩИ МОДЕРНИ КОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ – КАТО КЛЮЧОВИ ЕЛЕМЕНТИ НА СИСТЕМА ОТ СИСТЕМИ ЗА ЕФЕКТИВНО УПРАВЛЕНИЕ НА БЕДСТВИЯ

Георги Георгиев[1], Мехмет Аксит[2], Димо Зафиров[3], Петър Лулчев[1], Аксел Сикора[4], Лехослав Томашевски[5]

[1]Dr. Georgiev Consulting GmbH
[2]Composite Information Technologies B.V., Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD)
[3]Институт за Космически Изследвания и Технологии - Българска Академия на Науките (ИКИТ-БАН)
[4]Hochschule Offenburg
[5]Orange Polska
e-mail: georgi@georgiev-consulting.de

Ключови думи: *Управление на бедствия и аварии, дигитализация, форсайт, Модерна Въздушна Мобилност, Система от системи, Модерни Комуникационни Ссистеми, заинтересовани страни, Безпилотни летателни системи, образователни модели*

Абстракт: *През последните 150 години средната температура на земната атмосфера се е повишила с 1,3 °C, водещо до значително увеличение на екстремните природни явления и бедствия в нашите гъсто населени райони. Освен това, антропогенните бедствия, причинени от мащабни инциденти или войни, за съжаление са в нарастване.*

Проектът ERASMUS+ SUDEM (2023-1-BG01-KA220-HED-000159479) създава и валидира новаторски интердисциплинарен модел за трансфер на знания и учебна програма за висше образование, с фокус върху дигитализацията на целия цикъл на управление на бедствия и извънредни ситуации. Международният екип включва принципи на практика и образование от всички съответни области, включително мониторинг и управление на рискове и бедствия, подкрепа при вземането на решения, изкуствен интелект, интернет на нещата, наука за данните, дистанционно наблюдение (сателити и дронове) и обединяване на данни и тяхното управление.

Проектът обединява консорциум от водещи европейски организации за висше образование и научни изследвания, като използва международното сътрудничество за съгласуване на академичните програми с изискванията за оптимално управление на бедствия, включително подкрепа при вземането на решения. SUDEM поставя акцент върху създаването на адаптивни и достъпни образователни модули, които могат да бъдат внедрени в различни организации за висше образование и организации за учене през целия живот.

Настоящият документ представя резултатите от форсайт изследването на проекта SUDEM - основен елемент от методологията на проекта, който позволява изработването и предоставянето на ефективен отговор на идентифицираните нужди и предизвикателства, потенциални решения, подходяща системна архитектура и оптимален сценарий за бъдещо развитие, включително образование, управление на процеси, политика и накрая уникален пакет от знания и обучение като основен резултат от проекта.

Introduction and background

Introduction

With climate change the global average temperature has measurably increased which in turn has created a constantly higher relative humidity. With this, the number of extreme environmental events has significantly risen, affecting populated and often remote areas. Additionally, anthropogenic or human-caused disasters such as large-scale accidents and warfare consequences have also been contributing to catastrophic loss of life and infrastructure. Dealing with these is the domain of Disaster Management (DM) which is responsible for the preparation, response, and recovery from disasters [1]. The involved entities include emergency response services, operators and vehicles, hospitals, communication and coordination systems, monitoring systems, weather forecasting, policy and decision making entities, DM response control centres, and more. However, novel technologies and methods are on the way to improve many aspects of this critical domain. Advanced Air Mobility (AAM) is to unlock easy access to the third dimension, and digitalisation and Advanced Communication Systems (ACS) are to enable the optimal timely AAM operations and enhance the DM's capabilities.

The SUDEM project – ERASMUS+ KA220

In this regard, the SUDEM project is a 2-years EU-project, coordinated by SRTI-BAS, for the Sustainable Disaster and Emergency Management Processes Digitalisation. Its idea is to establish and validate a novel interdisciplinary higher education and LLL knowledge transfer model and curriculum. The project is aimed at Higher Education and Life-Long Learning organisations, and is focused on the digitalisation of the overall disaster and emergency lifecycle planning, handling, and management processes. The final goal is to create a pool of highly-capable DM experts with an adequately intensive focus on digital tools incl. Unmanned Aerial Systems (UAS), and thus to contribute to significant long-term decrease in disaster-caused life and infrastructure losses.

What is Foresight and why do we apply it?

The SUDEM project is to also deliver a Foresight document on DM, the integration of advanced digitalisation – including ACS, and AAM. But, what is Foresight? For context, the DM System of Systems (SoS) is a complex and interdisciplinary field, and integrating new technologies and methods needs to be planned with strong consideration and long-term perspective of social, economic, and environmental factors. Thus, strategic foresight allows for: the identification of thematic challenges and opportunities for solutions, the exploration of development scenarios, and for the provision of policy making support [2]. It is a highly flexible format which enables interdisciplinary solution creation and development - invaluable precisely for DM, the integration of adequate digital technologies and methods, and the widespread adoption and operation of AAM in this context.

Our relevant public funded projects

Other relevant public funded projects where the SUDEM team participated and gathered experience and knowledge from are the following:

- REGUAS (German Federal Ministry for Digital and Transport, 2022–2024): where it was investigated how the supply of rural areas with high added value (and urgent) goods could be optimally energy efficient in a regional context using multirotor UASs.
- AiRMOUR (Horizon 2020, 2021–2023): where the major outcome was a foresight on the current status of the interdisciplinary field of air mobility, identifying the challenges and exploring the possible solutions.
- 5G!Drones (Horizon 2020, 2019–2022): where the goal was the trialling of several UAV use-cases for the covering of various 5G services.
- ETHER: which addresses the issue of vertical handovers between Terrestrial Networks (TN) and Non-Terrestrial Networks (NTN) (satellites, low altitude platforms) to guarantee Quality of Service (QoS) and service availability.

Disaster management (DM)

To further expand on DM, there are various disasters impacting Europe and the world - natural/environmental and human-caused. The former includes floods, earthquakes, storms, strong winds, volcanic eruptions, wildfires, and more, while the latter includes pollution, industrial accidents, warfare, transportation accidents, etc [3]. There are multiple stakeholders and systems involved in the preparation and response to such events which requires efficient and effective coordination for the successful execution and completion of operations. The relevant challenges for achieving more resource efficient DM include the following:

- Insufficient utilisation of the aerial domain (3rd dimension) in critical situations, which is potentially a vast advantage in disaster situations (remote access and better perspective/view point).
- Lack of or underutilisation of digital technologies for the further enhancement of DM capabilities.
- Lack of or insufficient communication and coordination systems in critical locations.
- Insufficient situational awareness in highly dynamic situations.
- More efficient and effective structure for collaboration between stakeholders.

Moreover, 2/3 of the world's population lives in Metropolitan areas and in many cases these can be classified as mega cities with populations between 20 and 40 million inhabitants. Each citizen in the world corresponds to 115 t building mass, and for a citizen in Germany – 490 t building mass. This means that each citizen contributes with thousands of EUR towards various infrastructure, thus protecting it is imperative, as well as optimising the resource efficiency of DM operations. Ultimately, preparedness, mitigation, sensing, and prediction and forecasting should be just as important if not more than simply the adequate reaction to disasters.

Towards resource efficient Disaster Management

SoS approach and why?

To achieve an optimal DM structure and integration of novel technologies and methods a System of Systems approach is needed. A definition of SoS is: "A collection of independent systems, integrated into a larger system that delivers unique capabilities. The independent constituent systems collaborate to produce global behaviour that they cannot produce alone" [4]. In this context the relevant DM systems include emergency services, sensing stations, hospitals, air traffic control, relevant agencies, military units, volunteers, logistics, transport hubs, etc. And with the digital and AAM domains this also includes operators, Unmanned Vehicles (UV), relevant operational and maintenance logistical hubs, data centres, communication services, etc. Thus, SoS is needed for the clear and better communication and coordination pathways between the relevant stakeholders, clear operational and responsibility structure, improved process efficiency, and adequate, effective, and timely resource allocation and tasks execution.

AAM

AAM can be defined as aerial systems that provide services in novel ways through the usage of aircraft in domains that can benefit significantly from them. UAS are already in use for DM, however, their full potential is yet to be realised. Moreover, UASs' added value is increased in the context of extreme emergency conditions - for example disasters, meaning that environmental sustainability becomes secondary in this case. Also, collapsed buildings, landslides, damaged infrastructure, harsh geography, and more can all block DM efforts in which case public service is the priority, thus the need for aerial utilisation via UAS. Drones can perform tasks such as critical goods delivery, situational monitoring, search and rescue, communications transfer, etc. However, for this AAM potential to be utilised, ready, resilient, and redundant ACSs and/or smart on-board systems must be available to ensure the operational sustainability, flexibility, and safety of the aerial systems.

Our relevant projects: insights

Work during the REGUAS project assessed the operational feasibility of rural UAS logistics for high added value goods, with emphasis on using multirotor UAS. The assessment was conducted through simple flight simulation, via an energy estimation model for multirotor drones in MATLAB, and then with the execution of practical validation tests. The reference flight path was a 16 kilometres round trip between two settlements and with a 2 kg payload. The results from the energy estimation model include the range and the optimal energy efficient velocity of the studied multirotor UAV (as shown on Figures 1 and 2). The conclusion was that medium-sized multirotor UAVs can perform reasonably well at medium ranges and in remote areas with the added benefit of being able to carry payloads of useful sizes and weights. The conducted optimal velocity estimation allows for the planning of useful cargo amount and range.

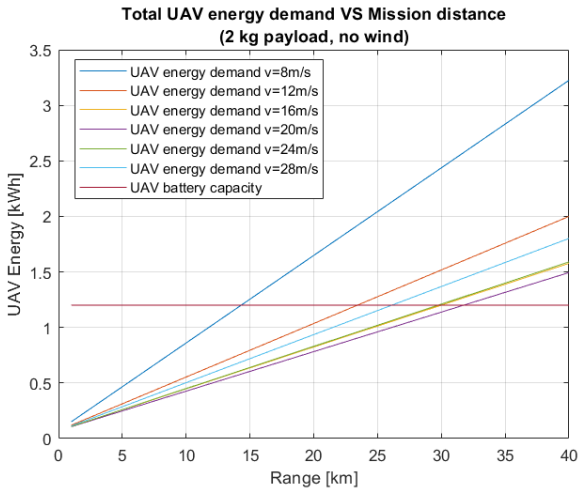


Fig. 1. Relation between total energy demand and mission distance for various airspeeds and a 2 kg payload, the horizontal line represents the energy capacity of the REGUAS UAV's battery

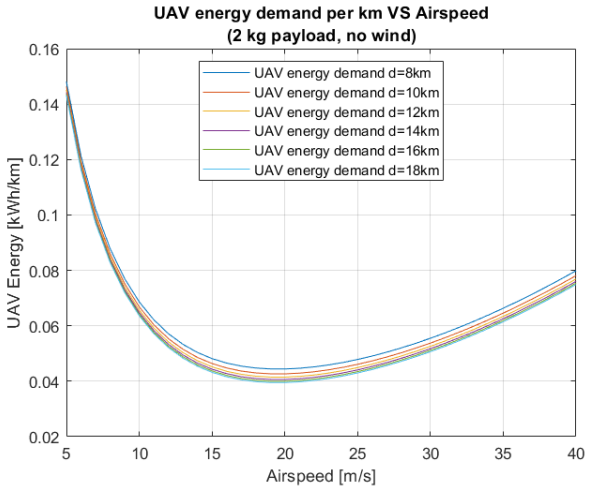


Fig. 2. Relation between energy demand per unit distance and airspeed for various ranges and a 2 kg payload

The work at the 5G!Drones project included the further development and commercialisation of 5G cellular drones teleoperated at a distance of up to 100 km or performing autonomous logistics tasks. Furthermore, tethered drones were acting as occasional 5G base stations or broadcasting/jamming nodes.

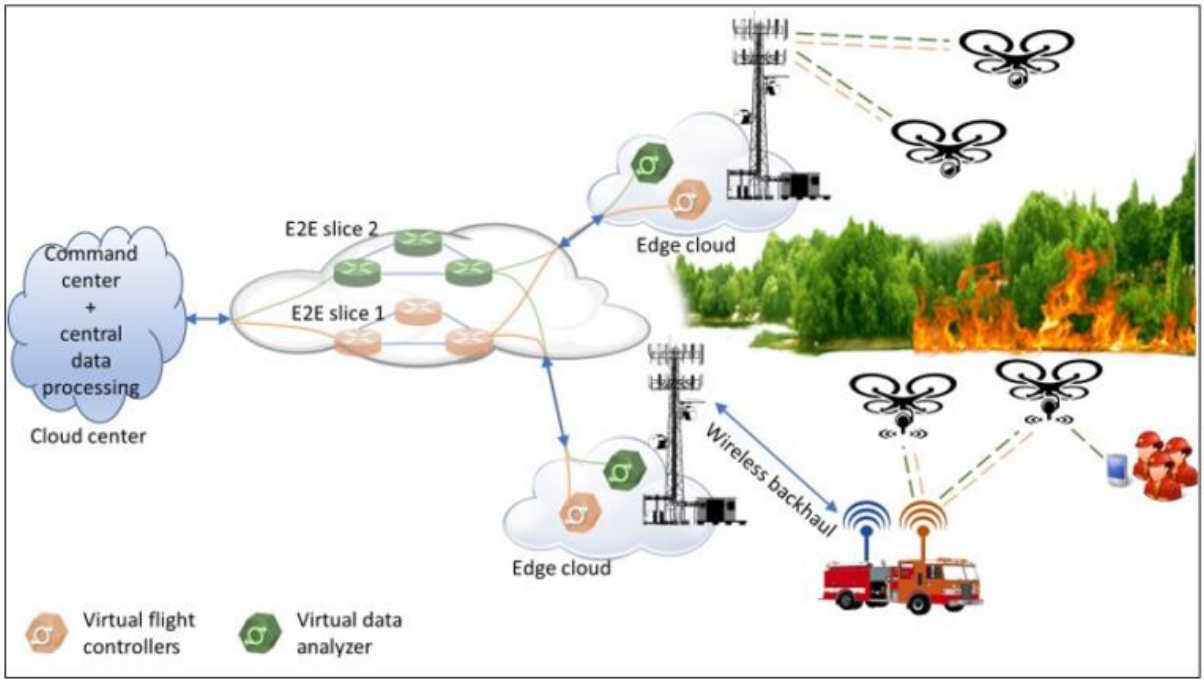


Fig. 3. Public safety/saving lives use case

Digital tech incl. ACS - key AAM enablers and DM enhancers

To achieve operationally sustainable, resource efficient, and safe AAM, as well as to enhance DM capabilities – digital technologies and methods, including ACSs, are needed. The way advanced digital technologies, incl. ACS, will enable this is through the following:

- Monitoring of air traffic for safe DM AAM operations.
- Provision of navigational and communication capabilities in remote regions and extreme situations.
- Defence against unauthorised system access/denial, and its misuse.
- Efficient and effective coordination by the involved stakeholders.

The key digital and ACS technologies and methods to be utilised include the following:

- Tethered drones acting as mobile communication hubs.
- Standardisation protocols – for international airspace management.
- Cybersecurity protocols which will be a key enabler of safe operations – especially important for DM.
- Utilisation of IoT and remote sensing, edge computing, image processing, and Machine Learning (ML), which is to allow for better and autonomous decision making and forecasting of environmental events.
- Unmanned aerial vehicles Traffic Management (UTM) for safe and efficient AAM operations.

Novel education models – long-term operational sustainability

To ensure sustainability and operability of novel systems in the DM domain, long-term educational pathways for new and experienced professionals must be established in higher education, and lifelong learning and train-the-trainers methods. The main identified educational domains for the DM domain of the future are:

- DM fundamentals: Workflow and risk mitigation, Disaster monitoring, Multi-Agent Decision making processes, System resilience, Nuclear safety, and DM.
- Digitalisation: Data-driven decision making support, IoT, ML, Edge Computing, cybersecurity, communication protocols, etc.
- Train-the-Trainers: long-term sustainable increase of the pool of highly capable experts and trainers in the DM domain – to educate the people who will educate the next generations.

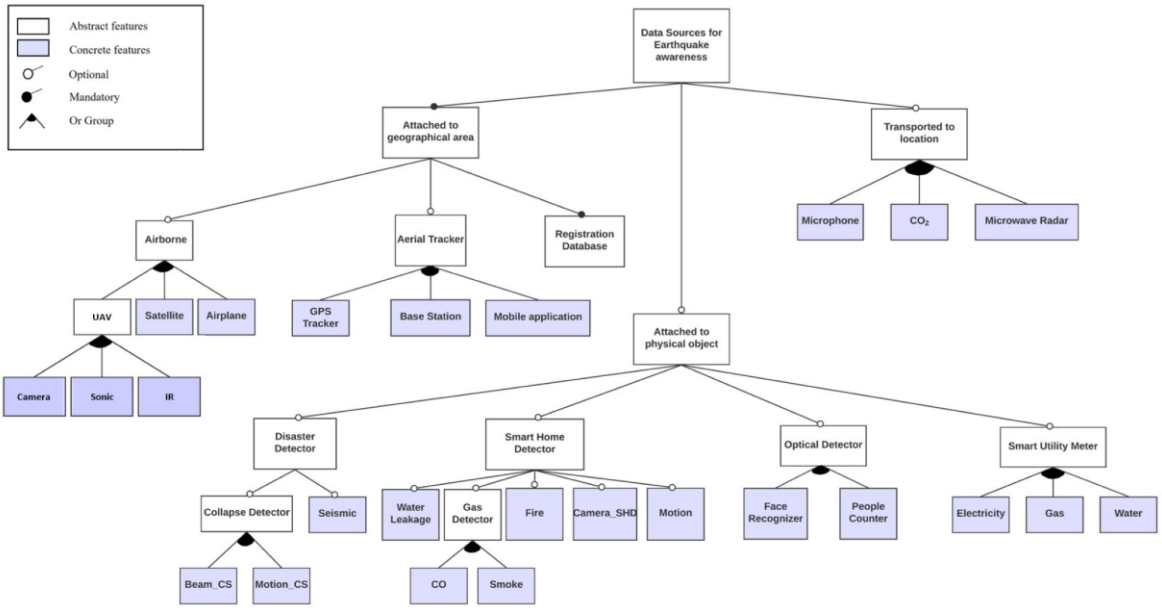


Fig. 4. An example data sources domain architecture of the envisioned SUDEM SoS

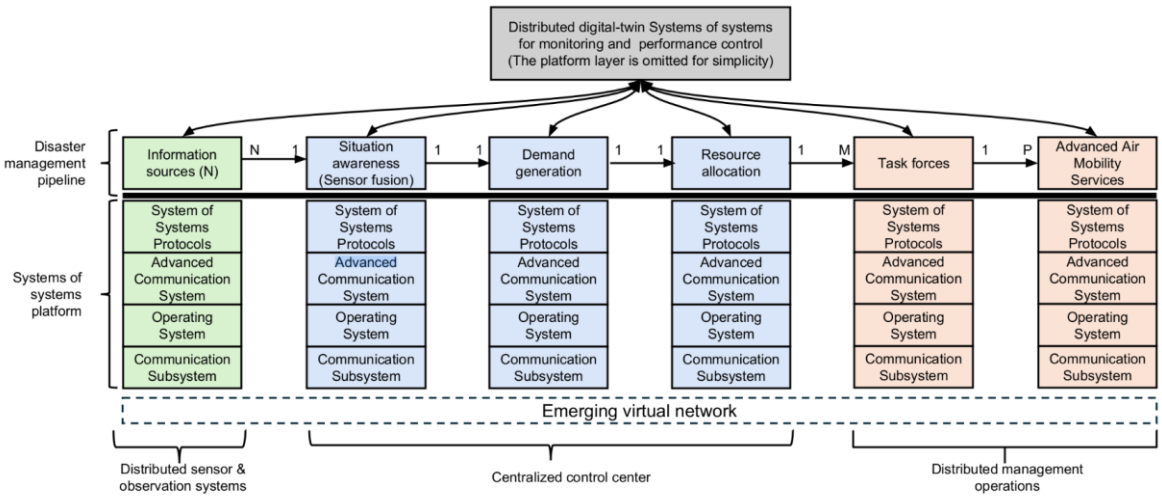


Fig. 5. An example AAM-supported SoS architecture for DM

Conclusion

The main conclusions of the SUDEM work so far include the following points:

- An SoS approach is needed to allow for efficient and effective communication and coordination of DM stakeholders, their systems, and for the allocation of critical resources.
- AAM is a critical resource for utilising the vertical domain and allowing for better and novel DM operations, however, its potential is yet to be fully utilised.
- Digital technologies, including ACS, will be the key enabler of operationally sustainable AAM operations, including their safety and efficiency.
- Long-term educational models, in HED & LLL, on novel relevant technologies and methods are crucial for better DM outcomes in the future.

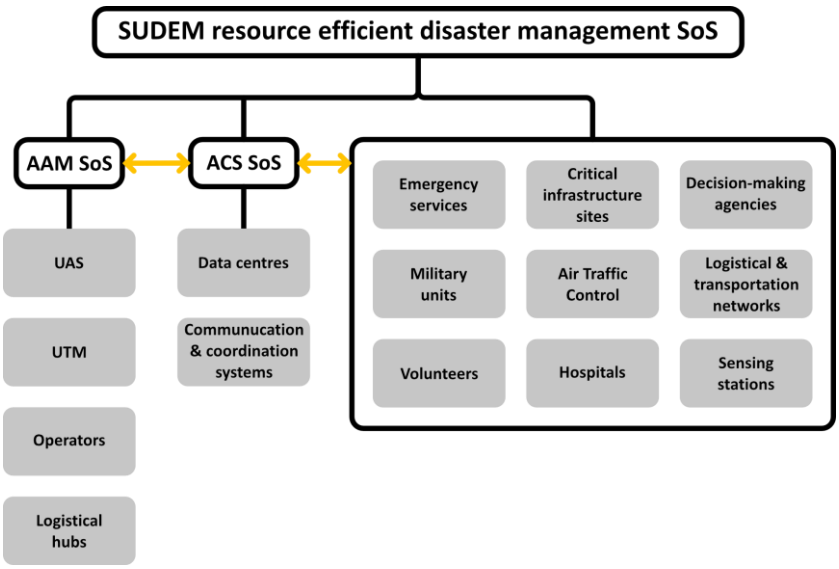


Fig. 6. An example of the SUDEM overall SoS approach

FORESIGHT results

What are the main findings?

- A System of Systems (SoS) approach is needed for the Disaster Management (DM) domain together with Advanced Air Mobility (AAM) and Advanced Communication Systems (ACS), in order to improve processes efficiency and decision-making support. AAM through Unmanned Aerial Systems (UAS), equipped with imaging technology and sensors, can play a crucial role in situational assessment, especially in disaster zones that are inaccessible by traditional means, and ACS will be achieved by combining data from various sensors to plan adequate and effective resource allocation for optimal response and prevention of tragic outcomes. Sustainable and efficient AAM will be achieved through ready, resilient, and redundant ACSs.

- The future identified development directions, addressing the digitalisation challenges, are focused on the need for standardised protocols, enhanced cybersecurity measures, and advanced predictive capabilities. The optimal future, envisioned in this report, involves a fully integrated DM framework where real-time data sharing, predictive analytics, and autonomous decision-making systems operate seamlessly across borders.

What are the implications of the main findings?

- The DM SoS approach, through sustainable and efficient AAM which will be achieved together with ready, resilient, and redundant ACSs, would enable a cohesive and rapid response to a wide range of disaster types, including floods, earthquakes, wildfires, and industrial accidents, leveraging technologies to automate and enhance resilience in disaster response.

- Based on the findings of the authors from several relevant EU projects and the findings of the current foresight study, the main SoS development and educational domains which should be the focus of future DM developments are: DM fundamentals & SoSs (Workflow and risk mitigation, Disaster monitoring, Multi-Agent Decision making processes, System resilience, Nuclear safety, and DM), Digitalisation (Data-driven decision making support, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Edge Computing), ACSs, and Train-the-Trainers (towards long-term sustainable increase of the pool of highly capable experts and trainers in the DM domain).

- Currently defined standardised AAS capabilities and long-term vision of their development generally include wide range of current and future needs of AAS including their application to DM; however, implementation (by vendors) and deployment (by mobile network operators) of features crucial for AAS and DM may need systemic support from authorities/regulators and joint, cross-industry sustainable roadmap planning.

References:

1. https://www.undrr.org/terminology/disaster-management
2. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/strategic-foresight_en
3. https://doi.org/10.1080/08998280.2001.11927751
4. https://www.incose.org/publications/technical-product-catalog/sos-primer

ЗЕЛЕНА АПТЕКА: ПРИРОДОСЪОБРАЗНИ МЕДИЦИНСКИ ИНОВАЦИИ 50-ГОДИШНИНА ОТ СЪЗДАВАНЕТО НА ПЪРВАТА НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКА БАЗА КЪМ МНЗ

Роксандра Памукова-Майкълсън

Медицински университет – София
e-mail: r.pamukova@foz.mu-sofia.bg

Ключови думи: *Научно-практическа база по фитотерапия, лекарствени растения, фито-фармация, изобретения, астма, епилепсия, затлъстяване, социалнозначими болести, екология, медицина*

Резюме: *През 1975 г. се основава първата Научно-практическа база по фитотерапия в България към Дирекция „Технически прогрес“ в Министерството на народното здраве в България, ръководена от д-р Димитър Петров Памуков. Там той изобретява фито-фармацевтични лекарствени средства за редица социално значими заболявания, считани за нелечими и с голяма тежест върху общественото здраве поради инвалидизация.*

Забележителен е фундаменталния принос на организацията поставила основите на нова медицинска област в България – фитотерапията. Изследванията на профилактичния и терапевтичния ефект на лечебните растения се основават на доказателствената медицина. Научното звено е се утвърждава със своите природосъобразни иновации без странични ефекти.

GREEN PHARMACY: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MEDICAL INNOVATIONS 50th ANNIVERSARY OF THE ESTABLISHMENT OF THE FIRST SCIENTIFIC PHYTOTHERAPY CENTRE AT THE BULGARIAN MINISTRY OF HEALTH

Roxandra Pamukoff-Michelson

Medical University – Sofia
e-mail: r.pamukova@foz.mu-sofia.bg

Keywords: *Scientific Phytotherapy Centre, medicinal plants, phyto-pharmaceutical, inventions, asthma, epilepsy, obesity, socially significant diseases, ecology, medicine*

Absract: *In 1975 Prof. Dr. Dimiter Petroff Pamukoff founded the first Scientific Phytotherapy Centre in Bulgaria, reporting to Technical Progress Department of the Ministry of Health. There, he invented innovative phyto-pharmaceutical medicines for socially significant diseases with high burden on public health due to their impact on morbidity.*

The fundamental contribution of the organization that laid the foundations of the medical field of phytotherapy in Bulgaria is remarkable. Research of medicinal plants' profilactic and theraupetic effect was based on evidence-based medicine. The Scientific Phytotherapy Centre is renown for its enviromentally friendly therapies without side effects.

Въведение

Вече 50 години в Научно-практическата база по фитотерапия се изобретяват иновативни препарати от лекарствени растения, допринесли за лечението и за подобрението на качеството на живот стотици хиляди болни. Разработени са 9 фито-фармацевтични комплекса, признати за изобретения за лечението на социалнозначими, трудолечими и инвалидизиращи заболявания. След клинични изпитвания те са са внедрени и са отличени с национални и международни награди за иновативен принос към медицината.

Фиг. 1. Проф. д-р Димитър Памуков – основател и ръководител на
първата Научно-практическа база по фитотерапия в България в ПОБ „Д-р Рачо Ангелов”

Първата Научно-практическа база по фитотерапия в България е основана със заповед на Министъра на народното здраве № 4758 от 07.04.1975 г. с ръководител д-р Димитър Памуков. Звеното е в рамките на Окръжните болници, с основна дейност в Първостепенна Окръжна болница „Д-р Рачо Ангелов”, днес УМБАЛ „Св. Анна”, но под непосредственото ръководство на Дирекция „Технически прогрес“ на МНЗ [1, 3, 4, 5, 6, 9, 27].

Проф. д-р Димитър Петров Памуков е лекар и изобретател, известен с новаторския си принос в областта на научната фитотерапия – съвременното билколечение. Базирано на доказателствената медицина, прилагайки съвременни епидемиологични методи изследва терапевтичния ефект на лечебните растения и лекарствата, произведени от тях, обусловен от техния химичен състав и фармакологично действие. Колосалният му многогодишен труд допринася за утвърждаването на фитотерапията като медицинска наука

Роден в град Русе в Царство България на 15 октомври 1922 година, Димитър Памуков израства в семейството на индустриалеца Петър Памуков и съпругата му Ружа. Този фундамент допринася за практическата насоченост, ефикасност и приложимост на иновативните му билкови комбинации, насочени към социалнозначими болести по-късно през годините на икономическия възход на българската фармация и фито-фармация. Жизненият му път, подобно на много изобретатели, е белязан с поредица от предизвикателства и обрати на съдбата, свързани с бурната историческа епоха [21].

През Втората световна война смелостта на младия санитарен подофицер Димитър Памуков, с която спасява ранените по време на бойните действия, както и помощта, която оказва на страдащите, му спечелват ордени за храброст. На 31 март 1945 година съдбовно изпитание определя голямата му мисия в живота. Раняване в главата, докато спасява пострадали войни причинява парализа на цялата дясна част на тялото му. Лекарите определят, че състоянието му е нелечимо [21].

Като студент в Медицинския факултет при Софийския университет се научава да пише с лявата ръка и посещава лекциите с инвалидна количка [20, 21]. Значителните терапевтични успехи с лечебни растения на лекаря на 1 пехотна Софийска гвардейска дивизия – санитарен полковник д-р Добри Драгнев Еребаканов (роден на 20 октомври 1895 година в Търговище), завършил медицинското си образование във Виена и уволнен при прочистване на армията от царски офицери на 13 юли 1946 година, са легендарни през епохата. Обнадеждениият млад човек се доверява на фитотерапията и започва стриктно да се лекува. Благодарение на приложените извлеци от лечебни растения за учудване и радост на своите колеги се възстановява от парализата. Благодарният студент продължава обучението си в кабинета на спасителя си – д-р Добри Еребаканов [2, 21].

Целта на публикацията е да се анализират дейността и иновациите на Научно-практическата база по фитотерапия под непосредственото ръководство на Дирекция „Технически прогрес“ на МНЗ.

Начало на фитотерапията като медицинска наука в България

През 1968 г. д-р Димитър Памуков в съавторство с магистрите-фармацевти Илия Ланджев и Александър Хвърлев пише книгата „Билките и тяхното използване“, публикувана от „Земиздат“ [7]. Търпеливата над двадесетгодишна работа с пациенти и проучванията на терапевтичния ефект на стотици лекарствени растения се увенчават с успех, който води до създаването и утвърждаването на ново научно направление в българската медицина.

Благодарение на писма от благодарни пациенти, сред които и лекуваният от астма писател и заместник-председател на Президиума на Народното събрание (1950–1962 г.) академик Георги Караславов през 1972 г. Министерството на народното здраве разкрива първият официален кабинет по фитотерапия в България в Трета градска болница. В него д-р Димитър Памуков лекува хиляди болни с лечебни растения.

През 1974 г. председателят на Държавния съвет на НРБ Тодор Живков препоръчва с писмо да се основе специализирано болнично заведение за билколечение [3,4,5,6].

Със заповед на МНЗ № 4758 от 07.04.1975 г. се създава Научно-практическа база по фитотерапия „с оглед да се създаде практическата възможност за внедряване на опита на д-р Димитър Петров Памуков в областта на фитотерапията“. Новоразкритото научно-практическо звено, ръководено от д-р Памуков е първоначално с 4 щатни бройки. Към него е предвиден аптечен пункт, който осъществява билкодоставките и снабдяването на населението за внедряването на нови фитотерапевтични средства и методи на лечение. Научно-практическото звено е в рамките на Окръжните болници, с основна дейност в гр. София, но под непосредственото ръководство на Дирекция „Технически прогрес“ на МНЗ [3, 4, 5, 6].

Базата в Първостепенната Окръжна болница „Д-р Рачо Ангелов” се разраства благодарение на хиляди излекувани пациенти предимно от България, Гърция, Югославия и дори от Австрия, Германия, СССР, САЩ и Австралия със създадените от д-р Памуков иновативни фитофармацевтични рецепти от лекарствени растения за лечение на астматични бронхити при деца и възрастни, доброкачествени тумори на матката – миоми, холелитиаза, епилепсия, енурезис ноктурна, алергии и други. Болните се записват и чакат за преглед с месеци. Д-р Памуков обучава лекари в областта на фитотерапията и се обособяват 3 специализирани сектора: вътрешни болести – ръководен от д-р Димитър Памуков; акушеро-гинекология – ръководен от д-р Борис Ризов, а след пенсионирането му – от д-р Григор Желязков и педиатрия от д-р Тодорка Митова. Всеки сектор се завежда от специалисти, което дава възможност да се направи професионален анализ на резултатите от проведената научна работа и клиничните проучвания. През 1980 г. МНЗ разкрива кабинети по фитотерапия към НПБ във всяка окръжна болница. В Пловдив са отворени 2 кабинета [1, 3, 4, 9, 27].

Фиг. 2. Д-р Памуков в Научно-практическата база по фитотерапия в ПОБ “Д-р Рачо Ангелов”

Към НПБ по фитотерапия е изграден методичен съвет от 10 члена, в състава на който влизат изтъкнати учени и специалисти по проблеми, свързани с фитотерапията и лекарствените растения [3].

След указанията, отпечатани в държавни и партийни документи за разширяване на билколечението у нас в редовната програма на студентите от висшите медицински институти от 1976 г. е включен предмета фитотерапия [9].

Почвените и климатични условия играят съществена роля за предаване на ценни лечебни свойства на билките (активни вещества, микроелементи и др.). НПБ по фитотерапия създава контакти с Института по климатология, института по почвознание „Пушкаров“, Института по ботаника към Българската академия на науките и други [3].

Развитие на фитофармацията в България

През 1977 г. Държавният съвет приема „Основни насоки за опазване, култивиране и рационално използване на лечебните растения в НР България“, за изпълнението на които Министерският съвет утвърждава с решение № 193 специална програма до 1990 г. Създава се Съвет по лечебните растения като помощен орган на Министерския съвет. В ръководството му са: чл. кор. Любомир Желязков – първи зам.-председател на Държавния комитет за наука и технически прогрес; Иван Манолов – зам.-председател на Държавния комитет за планиране, чл. кор. Герасим Митров – зам.-министър на народното здраве и председател на Фонда на ООН за подпомагане на деца (УНИЦЕФ) в България; чл. кор. Веселин Петров – директор на Института по физиология при БАН; проф. д-р Коста Заимов – зам.-председател на Медицинска академия, Васил Вачков – първи зам.-председател на ЦКС, инж. Ангел Кирков – генерален директор на ДСО „Фармахим“ и д-р Димитър Памуков завеждащ на Научно-практическата база по фитотерапия.

Организацията насочва работата си по три направления:

1. Държавният комитет за планиране, Националният аграрно-промишлен съюз и Централният кооперативен съюз трябва да осигурят изпълнението на програмата за разширяването на площите с лекарствени растения с цел стабилно фитохимично производство, както и разширяване на производствената база за фитофармацевтични лекарства на ДСО „Фармахим”.
2. Увеличение на изкупуването на билки, тяхното правилно съхранение и рационално използване за задоволяване на вътрешните потребности и за износ. Създаване на резервати като семенен фонд за билки.
3. Увеличаване на относителния дял на преработените в страната билки и разнообразяване на лечебните препарати и средства. Постепенно разкриване на кабинети по фитотерапия и билкови аптеки в окръжните градове. Предвижда се повишаване на знанията на студентите и лекарите в областта на фитотерапията в системата за следдипломна квалификация. Отчита се, че „много лекари неоснователно се страхуват да прилагат фитотерапията” [5, 21].

Към Държавния комитет за наука и технически прогрес е създадена координационна програма „Биологично активни вещества от растителен произход“, която се разработва от 23 звена. Държавният комитет за планиране съставя годишни разчети за засяване и отглеждане на лечебни растения. Рекултивират се 17 200 дка с билки. България е значителен производител на ментово масло, шипки, босилек, валериана, култивиран мак и други лечебни растения. В Бургаски окръг се култивира блатно кокиче. Поради иновативните български сортове и технологии добивът на ментово масло от декар е 6 kg. Предвижда се профилирането на един АПК за отглеждане на лечебни растения [3, 5, 21].

Обновява се лабораторната и производствената база на „Билкокоop“, окръжните кооперативни съюзи и потребителните кооперации. Координира се дейността на още 14 научни звена, които се занимават с проучване на билки. Увеличава се аптечната мрежа за изпълнение на билкови рецепти. Всички тези мероприятия създават условия за по-широко използване на фитотерапията от българската медицина [3, 5, 21, 22].

Ежегодно се провеждат курсове за подобряване на квалификацията на лекари, фармацевти, билкосъбирачи и закупчици, ръководени от д-р Памуков. Екипи проучват най-съвременните технологии в СССР, Германия и Франция за лабораторно изследване, максимално запазване и извличане на биологично активните вещества в лекарствените растения [1, 3, 5, 8, 21, 24].

Фиг. 3. Проф. д-р Памуков представя фито-фармацевтичните си изобретения на международно изложение на Фармахим

Благодарение на обширната мрежа от търговски представителства на ДСО „Фармахим“ българските лекарствени растения и фитопрепаратите, изобретени в НПБ по фитотерапия се предлагат в около 70 страни [5].

Научноизследователска дейност и иновации

В Научно-практическата база по фитотерапия към Първостепенна Окръжна болница „Д-р Рачо Ангелов” и Дирекция „Технически прогрес“ на МНЗ, основана и ръководена от проф. д-р Памуков са проведени обширни научни изследвания на лекарствени растения от висококвалифицирани специалисти и лекари. По данни на МНЗ и Комитета за държавен и народен контрол годишно в звеното са лекувани успешно над 25 хиляди пациенти от заболявания с висока степен на сложност, включително животозастрашаващи и инвалидизиращи. Редица от тях са считани за нелечими от медицинската наука до създаването на българските изобретения [1, 20, 24, 26, 27].

Базирайки се на опита си, проф. д-р Д. Памуков разработва, прилага и проверява в амбулаторни условия над 250 рецепти през 70-те и 80-те години на XX в. Автор е на 8 клинично изпитани фитофармацевтични комплекса, признати за изобретения: за лечение на яйчникови разстройства с миоматозни разраствания („Дисоварио Пам“), астматични бронхити при деца и възрастни („Бронхо Пам“), епилептични заболявания при деца и възрастни („Епи Пам“), енурезис ноктурна при деца и юноши („Енурезо Пам“), за тонизиране на сърдечно-съдовата система и нормализиране на половата система („Афро Пам“), за жлъчнокаменна болест и жлъчни дискинезии („Холо Пам“), за язена болест на стомаха („Гастро Пам“). Изобретява „Гастро Пам А“ за атрофични гастрити с или без язва, билипанкреатити и разстройство на чернодробната функция, придружени с намалено жлъчегонно действие и за възстановяване на организма след тежки заболявания, придружени с намаляване на апетита. Създава технологии за 4 ванни препарата: „Дерма Пам“, „Артро Пам“, „Седа Пам“ и „Седа Пам I“ [3, 4, 20, 21].

Фито-фармацевтичните препарати се изследват в НИХФИ. Провеждат се независими клинични изпитвания у нас – в Медицинска академия, Военномедицинска академия гр. София и гр. Пловдив, Първостепенна окръжна болница гр. София и гр. Пловдив и в тогавашния СССР. Изобретенията са регистрирани, както в Института за изобретения и рационализации (ИНРА) с авторски свидетелства, така и като лекарствени средства и са внедрени в производство за вътрешния и външния пазар. Следва да се отбележи, че клиничните изпитвания на иновациите показват липса на странични ефекти, допълнителен позитивен фактор за подобряването на качеството на живот на пациентите [3, 4, 27].

Интерес представлява иновацията „Бронхо Пам“, наложила се от 80-те години за лечение на хиляди деца и юноши от астматични бронхити, който в комбинация с други фактори допринася DALYs (общият брой години загубени поради болест, инвалидизация или преждевременна смърт) заради астма в България да са сред най-ниските отчетени от СЗО – 0,4 на 1000 души, при граници 0,3–2,8 на 1000 души. В това отношение страната ни е с

по-добри показатели от водещи европейски държави като Германия (DALYs 0,6 на 1000 души), Франция (DALYs 0,8 на 1000 дущи), Великобритания, (DALYs 1,2 на 1000 души) и др. по данни на СЗО. Експортът на фитофармацевтичното средство и на другите изобретения на проф. д-р Памуков, за Гърция, СССР, както и за други държави от СИВ е значим [3, 20, 21, 22, 26, 33].

Фиг. 2. Изследвания на Холо Пам в Научно-практическата база по фитотерапия

Прогресивната роля на българската наука през този период е безспорна и тя се очертава като една от първите и водещите в изследванията на лекарствените растения и фитотерапията [21, 27]. Дванадесет години след създаването на НПБ по фитотерапия към МНЗ, през 1987 г. Европейският парламент призовава Европейската комисия „да спомогне въз основа на резултатите от научноизследователската дейност до днес, да се осигури разработването на научен подход към растителните лекарствени продукти".

Секция за Научно-практическата база по фитотерапия в Първостепенната Окръжна болница „Д-р Рачо Ангелов" е поместена в труда по история на билколечението и фитотерапията „Зелена аптека" от Барбара Григс, (Лондон, 1981 г.) [27].

Настоящ приемник е частната Научно-практическата база по фитотерапия, ръководена от проф. д-р Димитър Памуков и по-късно от доц. д-р Роксандра Памукова-Майкълсън. В него продължават научните изследвания в актуални медицински научни области като микробиология, имунология, Anti-aging – забавяне на процесите на стареене за активно дълголетие, епигенетика, превенция и терапия на хронични заболявания на респираторната, отделителната, опорно-двигателната и храносмилателната системи, затлъстяване и др. Разработени са рационализирани рецепти на „Бронхо Пам", както и сериите „Имуно Бронхо Пам" – за профилактика и терапия на заболявания на белодробната система и ОВИ, „Имуно Пам Плюс" – за профилактика и терапия на заболявания с вирусна етиология, серията „Холо Пам Плюс" – за профилактика и терапия на заболявания на черния дроб, жлъчния мехур и жлъчните пътища, серията „Ендокрино Пам" – за забавяне на процесите на стареене и балансиране на ендокринната система при мъже и жени, серията „Слим Пам" – за профилактика и терапия на обменни заболявания и редукция на наднормена телесна маса при мъже и жени със затлъстяване [4, 21, 22, 24, 29].

Заключение

Зелената аптека на природата подпомага великите постижения на лекарите през различни епохи, докосвайки позитивно съдбите на хората, побеждавайки смъртта и възстановявайки здравето на страдащите. По литературни данни редица легендарни традиционни медици са прилагали лекарствени растения. Сред тях са Орфей, Траке, Залмоксис, Иван Рилски, поп Богомил, Василий Врач и други [11, 18].

Заболявания, които се лекуват от традиционната ни народна медицина – от лечители и лекари, изучавали опита й, като Иван Раев (изобретателят на Cura bulgara), полк. д-р Добри Еребаканов, Петър Димков и други, са били считатни за нелечими по света. Мнозина, които са се докосвали до тези харизматични личности са се учудвали от техните постижения, като те

закономерно са получавали международно признание. Според проф. д-р Миладин Апостолов, Иван Раев, Петър Димков и много други лечители от традиционната ни медицина, допринасят за развитието на иновативни български лекарства и методи, доказали своята ефикасност [25].

В продължение на 50 години Научно-практическата база по фитотерапия допринася за лечението на над 500 хиляди пациента [21]. Заради изобретенията и постиженията си в областта на терапията на трудолечими инвалидизиращи заболявания, центърът ръководен от проф. д-р Димитър Памуков и по-късно от доц. д-р Роксандра Памукова-Майкълсън е отличен с над 30 национални и международни награди за иновативен принос към медицината от Белгия, САЩ, Франция, Русия, Китай, Португалия, Полша, Саудитска Арабия, Сърбия, Тайван, Чехия, Южна Корея и други. Сред българските отличия на звеното за заслуги към здравеопазването, както и за развитието на фитотерапията и фито-фармацията, допринесли за утвърждаване на престижа на България с икономически принос за експорта е „Орден на труда“ – златен. Научно-практическата база по фитотерапия е удостоена с почетния вимпел на Министерството на здравеопазването в Китай от „Държавната администрация за традиционна китайска медицина“ [21, 24, 29].

Литература

1. Захарько, В. Секреты доктора Памукова. Известия, 27.10.1978, с. 5
2. Йорданова, Л. Комунизмът и българите. София, с. 110
3. Лечев, В. М. Митев, С Израел, К. Панайотов. Път през годините...100 години Софийска Първостепенна окръжна болница (1879-1979). София, Ведомствено издание, 1979, с. 94–170
4. Мачковска, Т. Брежнев се е лекувал с нашенски билки. Д-р Памуков поставя основите на научната фитотерапия у нас. Седмичен Труд, бр. 22, 1.06.2011, с. 18
5. Нешев, Г. Лечебните билки – за здравето на народа. Работническо дело, 18 май 1979, с. 3
6. Министерство на народното здраве. Заповед № 4758 от 07.04.1975 г.
7. Памуков Д., Ил. Ланджев, Ал. Хвърлев, Билките и тяхното използване, София, Земиздат 1968
8. Памуков, Д. Фитотерапията – перспективен метод за лечение, София, Медицина и физкултура, 1979
9. Памуков, Д., Х. Ахтарджиев. Природна аптека (I изд.). София, Земиздат, 1981
10. Памуков, Д. Познаваме ли добре билколечението? (ръководство). София, Столична хигиенно-епидемиологична дирекция и ГК на БЧК, 1987
11. Памуков, Д., Х. Ахтарджиев. Природна аптека (II изд.). София, Земиздат, 1989
12. Памуков, Д. Х.Ахтарджиев. Аптека живої природи. Київ, Урожай, 1991
13. Памуков, Д. Домашна аптека (I изд.). София, Политрейд, 1994
14. Памуков, Д. Билки за жеата и детето – I част. София Гея-Либрис, 1995
15. Памуков, Д. Билки за жената и детето – II част. София Гея-Либрис, 1996
16. Памуков, Д. Домашна аптека (II изд.). София, Гея-Либрис, 1998
17. Памуков, Д. Билкова енциклопедия. София, Гея-Либрис, 2000
18. Памукова-Майкълсън, Р. История на медицината, фитотерапията и общественото здравеопазване. София, Централна медицинкса библиотека, Медицински Уноверситет – София, 2021, с. 11–91.
19. Смирнов, А. Секреты доктора Памукова. Огонёк, 27.06.1986, с. 3
20. Тошева. М. Доайенът на българската фитотерапия навърши 80 години. Трета възраст, 15 октомври 2002, с. 4
21. Христоскова, Д. Стената. Билката – богатство и... София, Новата цивилизация, 2025, с. 28–42
22. Чучуева, Ж. Проф. д-р Димитър Памукова – лекарят от Русе, който превърна фитотерапията в наука. Утро, бр. 211 (9536), 27.10.2022, с. 4
23. Явашчев , С. Подофицерския корпус в Българската армия 1878 – 1944 година (о.р. полк. Сево Явашчев). Министерство на отбраната на Република България https://www.mod.bg/bg/ba_gs_history.html (Достъп: 11.10.2025)
24. 40 years of the first scientific phytotherapy centre at the ministry of health in Bulgaria. Vagabond, 10/2015, p. 26–27
25. Apostolov, M., P. Ivanova. Bulgary-Italy Medical Relationships Med Secoli 1991;3 (2–3):191–206
26. Gembicky, J. Ako si uvariet zdravie. Svet socializmu, 1986 (17), s. 10–11
27. Griggs B. Green Pharmacy. A history of herbal medicine. London, Robert Hale. 1987, p. 329
28. Ikonomova, K. Les simples et la sante.18 – 24 Mai: Semaine des plantes medicinales. 18.05.1986, p. 2
29. Micael, J. Entrevista a Roxandra Pamukoff Preterson e Fernando Jorge Lopez, Portugal Protocolo, 2015 (26), p. 58–61
30. Pamukov, D., Achtardžiev, H. Prírodná lekáreň (1 vyd.). Bratislava, Príroda, 1986
31. Pamukov, D., Achtardžiev, H. Prírodná lekáreň (2 vyd.). Bratislava, Príroda, 1988
32. Pamukov, D., Achtardžiev, H. Prírodná lekáreň (3 vyd.). Bratislava, Príroda, 1991
33. WHO. Country Profiles of Environmental Burden of Disease, Bulgaria, 2006. (Retrieved: 11.03.2015, 7.11.2016 and 07.09.2020).

СЪВРЕМЕННИ КОРПОРАТИВНИ СТРАТЕГИИ

Надя Маринова-Миланова

Нов Български Университет – София
e-mail: nmarinova@nbu.bg

Ключови думи: *Корпоративно управление, Заинтересовани страни, Стратегическо управление, Създаване на стойност, Ресурсна зависимост*

Резюме: *Съвременните корпоративни стратегии представляват комплексен подход към управлението на организациите, който обединява теоретични концепции и практически инструменти за постигане на устойчиво развитие, конкурентоспособност и създаване на стойност. Те включват ключови теории като теорията на агенциите, теорията на заинтересованите страни, ресурсната зависимост и стратегиите, базирани на знанието. Основната им цел е да балансират интересите между акционери, мениджъри и други заинтересовани страни чрез ефективни механизми за контрол, прозрачност и координация. В съвременната динамична бизнес среда стратегическото управление играе решаваща роля за идентифициране на инвестиционни възможности, управление на корпоративни рискове и стимулиране на иновациите. Освен това, акцентът върху знанията като стратегически ресурс подкрепя процесите на създаване на стойност и дългосрочна ефективност. Корпоративните стратегии се разглеждат не само като средство за управление, но и като основен фактор за изграждане на партньорства, развитие на човешкия капитал и устойчиво пазарно позициониране на организациите.*

MODERN CORPORATE STRATEGIES

Nadya Marinova-Milanova

New Bulgarian University – Sofia
e-mail: nmarinova@nbu.bg

Keywords: *Corporate governance, Stakeholders, Strategic management, Value creation, Resource dependence*

Abstract: *Modern corporate strategies represent a comprehensive approach to organizational management, integrating theoretical concepts and practical tools to achieve sustainable development, competitiveness, and value creation. They encompass key theories such as agency theory, stakeholder theory, resource dependence, and knowledge-based strategies. Their main objective is to balance the interests of shareholders, managers, and other stakeholders through effective control mechanisms, transparency, and coordination. In today's dynamic business environment, strategic management plays a crucial role in identifying investment opportunities, managing corporate risks, and fostering innovation. Furthermore, the emphasis on knowledge as a strategic resource supports value creation processes and long-term efficiency. Corporate strategies are seen not only as a governance tool but also as a key factor in building partnerships, developing human capital, and achieving sustainable market positioning.*

Въведение

В своя съвременен прочит концепцията за корпоративно управление се оформя в рамките на бизнес етиката, приложена към организационната област и отнасяща се до личностните качества, ценностната система на хората и техните действия, в рамките на взаимодействията помежду им. Добрите практики за бизнес поведение са въплътени в етични кодекси, които разглеждат набор от ценности, установени в същата система или кодекс, за да бъдат от полза за компанията като цяло. По този начин корпоративното управление, рамкирано

в областта на бизнес етиката, се определя като системата, чрез която компаниите се насочват и контролират своите участници и среда.

Целта на стратегиите за добро управление е да защитят акционерите от властта на мениджърите, както и да гарантират, че има добър контрол на първите спрямо вторите, като се избягват проблемите, съществуващи между тях. В този контекст „стратегията на агенциите“ е тази, която изучава взаимоотношенията между акционери и ръководство, както и основните конфликти на интереси между тях. Понастоящем съществуват различни механизми за контрол, както външни (пазар на стоки и услуги, капиталов пазар и др.), така и вътрешни (борд на директорите, длъжностни характеристики и договори за възнаграждения, общо събрание на акционерите и финансова структура и др.). Всички те имат за цел да намалят съществуващите проблеми и предизвикателства, пред които се изправят съвременните корпорации.

Основна част

За да се съгласуват общите цели между акционерите и мениджърите, се появява фигурата на борда на директорите – ключов субект във вътрешните механизми, използвани от компаниите за контрол на техните ръководители. В зависимост от поредица от характеристики на борда се определя и нивото на култура на корпоративното управление. Колкото по-високо е това ниво на корпоративна култура, толкова по-малко проблеми и предизвикателства съществуват между акционери и ръководители. Според специализираната литература тези проблеми могат да бъдат сведени до минимум: от една страна чрез контрола на вътрешните механизми като тези, свързани със състава на борда на директорите, а от друга, чрез издаване на надеждна и адекватна финансово-счетоводна информация.

В началото на 90-те години на миналия век, предвид някои ограничения в корпоративното управление и като реакция на съществуващите стратегии се появява „стратегията за корпоративното управление“. Тази стратегия все повече следва психо-социологичната визия на корпоративното управление и разглежда управленските кадри като лоялни служители на организацията, предполагайки, че те следва да вършат работата си с висок професионализъм и да действат като ефективни мениджъри на нейните ресурси. Стратегията за корпоративното управлението предполага, че няма конфликт на интереси между собствениците и ръководители и търси организационна структура, която позволява координация за постигане на по-голяма ефективност. Според тази стратегия мениджърите са лоялни ръководители.

В специализираната литература се отчита, че мениджърите вече не са мотивирани от индивидуални цели, а по-скоро техните мотиви са в съответствие с целите на компанията и са доброжелателни в своите действия. Интересите на мениджърите са съгласувани с тези на акционерите и няма конфликт на интереси, който би могъл да бъде преодолян с механизми като финансови стимули. Според стратегията за корпоративното управление, тяхната първа отговорност е към акционерите. Конфликтите на интереси между групите на заинтересованите страни и компанията следва да бъдат разрешавани чрез натиска на конкуренцията на свободните пазари, подкрепени от законодателството и съществуващия контрол за защита на клиентите, служителите, доставчиците и обществото.

„Теорията за ресурсната зависимост“ обяснява стратегията за корпоративното управление, тълкувайки компаниите като взаимно зависими от контекста, в който работят, т.е. зависимостта от ресурсите и информацията, предоставени от други компании и агентите, в който се намират. Теорията за зависимостта от ресурси е ограничена до анализа на взаимоотношенията между партньори, мениджмънт и средата като цяло (компоненти, които установяват най-важните аспекти на корпоративното управление). Тя не взема предвид други заинтересовани групи (клиенти, служители, бизнес асоциации и/или доставчици). Така възниква и теорията на заинтересованите страни, която счита, че корпорациите следва да носят отговорност пред набор от заинтересовани страни в компанията, а не да бъдат ориентирани единствено и само към акционерите, тъй като всички тези страни могат да повлияят върху постигането на целите, на успех и развитието.

„Теорията на заинтересованите страни“ предполага, че всички участници в създаването на стойност имат право да участват в тази стойност, която се добавя в развитието на цялата верига на стойността. Този подход предполага, че корпоративното управление е ориентирано към защита и управление на възнаграждението на всички участници, като се вземат предвид техните алтернативни разходи. Отчитат се интересите на всички участници и заинтересовани страни в дружеството, които са засегнати от решенията и действията, които се извършват в него, както и тяхното участие в корпоративното управление. Компанията е връзка от договори между различните заинтересовани страни-акционери, но също и с кредитори, служители,

администратори, клиенти, доставчици, органи и др. или споразумение, според което компанията представлява кооперативна игра между различните заинтересовани страни.

В подхода на заинтересованите страни стратегията за корпоративното управление се влияе от взаимоотношенията между субектите, които се намесват в системата за корпоративното управление. Както ОИСР посочва, тези взаимоотношения са предмет (отчасти) на закони и разпоредби, но също така и на доброволно адаптиране и което е по-важно – на пазарни сили.

Сред стратегиите за корпоративното управление се наблюдава и подход като процес за създаване на стойност чрез появата на набор от инвестиционни възможности, който са малко или много пренебрегвани. За това разбиране ориентацията е насочена към „теориите на знанието“, т.е. създаването на стойност зависи непосредствено от идентичността и уменията на мениджмънта, разглеждани като единство. Спецификата на стратегиите за корпоративното управление се свързва със способността да генерира знания и следователно с дългосрочна рентабилност, като динамична концепция за ефективност.

Може да се направи извод, че когато една компания се разглежда като хранилище на знания, нейната стратегия за корпоративно управление се основава на:

- създаването на знание като основа за иновации и всички инвестиционни възможности – това знание е мълчаливо и социално, а характерът му затруднява имитирането му;
- защита на базата данни със знания;
- координацията на производствената дейност, която включва аспекти като изграждане, експлоатация и трансфер на знания, които надхвърлят простото предаване на информация;
- разрешаване на конфликти на интереси основани на знанието.

Стратегиите за корпоративното управление следва да подпомагат идентифицирането и прилагането на печеливши инвестиции с перспектива за динамична ефективност. За да се разбере влиянието на институционалната рамка и следователно на системата за осигуряване на качество в ефективна динамика, стремежът следва да е насочен към балансирането на три основни цели:

- да се насърчава голямо разнообразие от експерименти;
- инвестициите да са насочени към обещаващи разновидности на експериментиране и далече от безперспективни възможности;
- новите знания, които се придобиват, трябва да се използват широко.

В съвременните стратегии за корпоративното управление визията на теориите, базирани на знанието, следва да бъде разширявана, като се вземат предвид връзките между мениджмънт и инвеститори, както и потенциалът на тези връзки за увеличаване ефективността на компанията, включително за идентифициране и генериране на възможности за растеж. В по-широка перспектива подходът, основан на знанието, следва да има предвид връзките между мениджъри и инвеститори от гледна точка на тяхното влияние върху различните когнитивни аспекти в процеса на създаване на стойност.

От направеното изложение във връзка със стратегиите за корпоративното управление става ясно, че основната теория, която е повлияла върху развитието на това управление и е предоставила концептуална рамка за него, е „теорията на агенциите“. Компаниите, обаче, все повече осъзнават, че не могат да работят изолирано и че в допълнение към съобразяването с акционерите трябва да вземат под внимание и широк набор от заинтересовани страни.

Позовавайки се на първата теория, наречена „теория на агенциите“, тези, които управляват парите на други хора, не полагат същите грижи като самия собственик. „Ресурсната теория“ предполага, че успехът на компаниите зависи от управлението на ресурсите, предоставени от други, спрямо средата, в която се намират. За „теория на агенциите“, акционерите са единствените с право да участват в доходите, създавани от компанията. Тя се фокусира върху факта, че социалната отговорност трябва да пада директно върху хората, а не върху институциите, установявайки, че социалната отговорност не съответства на задълженията на компанията, нито е в нейна полза. „Теорията на заинтересованите“ страни постулира, че организацията трябва да се развива, като се вземат предвид интересите на основните заинтересовани страни (служители, клиенти, доставчици, кредитори), без да противоречи на етичните принципи, на които се основава капитализмът. Стратегиите за корпоративното управление се базират на обстоятелството, че няма конфликт на интереси между собственици и мениджъри и че целта е да се намери организационна структура, която да позволява координация за постигане на по-голяма ефективност.

Като най-често прилагани, стратегиите за корпоративното управление се отнасят до съществуваща връзка, която възниква между две страни – от една страна, управленско ниво, което включва мениджмънта на компанията, а от друга – собствениците като директори и акционери. Тази връзка се основава на имплицитни и изрични договорни условия, за да се гарантира, че всички страни могат да работят възможно най-ефективно за собствениците – те да увеличат максимално своите печалби чрез делегиране на правомощия и възлагане на определени дейности на управленското ниво на компанията, тъй като самите собственици не са достатъчно обучени да управляват и поемат необходимите задачи.

Може да се заключи, че стратегиите за корпоративното управление и техните хипотези оказват значително влияние върху корпоративното управление. Това вероятно се дължи и на преобладаващите изследвания, които се основават на предпоставката за основния принцип, че стратегията за корпоративното управление се фокусира върху проблема за разделението между управлението на дружеството и неговите ресурси. Още през 1932 г. в САЩ изследователите Бърл и Мийнс в свое проучване установяват значителни отклонения в интересите на мениджърите и собствениците, базирани най-вече на различията в техните мотиви.

Богатата гама от специализирана литература отразява разнообразие от теоретични концепции и подходи към стратегиите за корпоративното управление. Противно на това, което терминът корпоративно управление, колкото и двусмислен да е, понякога води до заключения, че целта на стратегиите за корпоративното управление не е свързана с това как мениджърите управляват, а по-скоро как те самите биват управлявани. Водейки началото си от финансовия модел, основан на защитата на интересите на акционерите, стратегиите за корпоративното управление се развиват към по-сложни модели, които включват всички групи заинтересовани страни и придават по-голямо значение на когнитивните аспекти в създаването на стойност. Тази еволюция, повлияна от множество промени, води до все по-значима роля на човешкия капитал при създаването на конкурентни предимства за корпорациите: предимства, базирани на знания и умения, често съчетани с подход към корпоративното управление, насочен към установяване на набор от взаимоотношения и условия, които дават тласък на участието на акционерите в добавената стойност на компанията.

В други случаи стратегиите за корпоративното управление вземат предвид, че тези, които допринасят за генерирането на тази стойност, следва да участват и в тяхното разпределение. В крайна сметка, целта на корпоративното управление е да даде възможни решения на проблемите, свързани с конфликта между акционери и управляващи, вземайки предвид влиянието, желанията и интересите на различни вътрешни и външни заинтересовани страни, като в същото време стремежът е насочен към максимизиране на печалбата и създаване на конкурентно предимство, оформяне на дългосрочни партньорства и отношения, както и създаване на стойност за корпорацията.

Изложените стратегии за корпоративното управление заедно със съвременните концепции разглеждат проблемите, пред които са изправени организациите днес, обръщайки внимание на ролите и отговорностите на участниците и заинтересованите страни на корпоративно ниво.

Многократното използване на понятието „корпоративна стратегия“ в изложението показва, че корпоративното управление е пряко свързано стратегическото управление. Основен белег на стратегическото управление, за разлика от тактическия и оперативния компонент на мениджмънта, е дългосрочната перспектива и дълбокото разбиране (визията) за това каква е една организация сега и каква желае (или би трябвало) да бъде в бъдеще. По този начин корпоративната стратегия може да бъде важно средство за определяне на корпоративната мисия на организацията и за определяне на нейните цели и приоритети в дългосрочна перспектива.

Литературата разкрива множество дефиниции на „корпоративната стратегия“, като се счита, че тя „представлява нещо повече от съвкупност от стратегии на бизнес единици и описва приоритетните критерии за разпределянето на корпоративните ресурси от внимание между дъщерните бизнеси на корпорацията, както и областите на хоризонтална интеграция между тях“. Корпоративната стратегия на всяка организация (независимо дали е стопанска или не), включително планирането, стратегическият анализ, позиционирането и самото мислене по посока на тази корпоративна стратегия, представлява процес, който следва да се планира и управлява.

На корпоративно ниво обикновено се изготвя план за корпоративна стратегия, създаден в рамките на следните цели:

- изготвяне и поддържане на стратегия, която постига корпоративното намерение, корпоративните ангажименти и очаквания на клиентите, акционерите и другите заинтересовани страни;
- поддържане на ангажиментите и изискванията на всички участници и бизнес сектори, по-специално отдели/звена и процеси, които поддържат стратегическото направление;
- комуникиране на стратегическата посока и съответните цели;
- управление на стратегическите промени с цел поддържане или придобиване на конкурентно предимство.

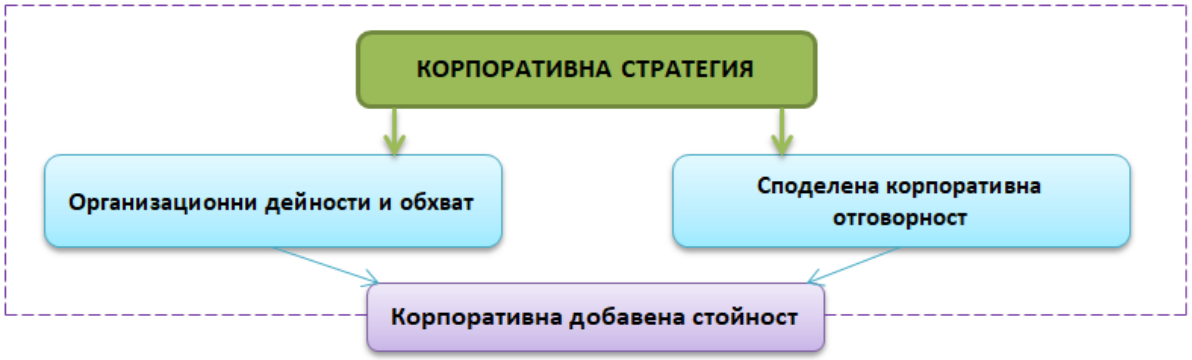
По своята същност корпоративната стратегия представлява портфолио от интегрирани бизнес стратегии, които ще постигнат корпоративното намерение и са в съответствие с финансовите инвестиции или ограничения, пред които е изправена групата.

Според специализираната литература специално отношение по въпросите за доброто корпоративно управление има нарастващият обем от международни инвестиции. Тези международни капиталови потоци осигуряват на организациите възможности за финансиране от много по-широк кръг инвеститори. Това още повече предопределя значимостта на друг ключов за корпоративното управление момент, а именно – управлението на риска на корпоративно ниво.

Във връзка с това стратегиите за корпоративното управление следва да включват няколко самостоятелни, но интегрирани процеси:

- анализ на корпоративните стратегически изисквания;
- съставяне на корпоративна портфолио стратегия;
- ангажиране с корпоративната стратегия;
- управление на стратегически промени;
- управление на корпоративния риск.

Ключови компоненти на корпоративната стратегия



Заключение

В заключение голяма част от отговорността за стратегията често се носи на корпоративно ниво от висшите ръководители. Степента на отговорност и отчетност, пред която са изправени, ще зависи от степента на позволената автономия и ограничения, наложени от корпоративното управление. Въпреки това, крайната отговорност за корпоративното управление/стратегия винаги е на Борда на директорите.

Председателят на Борда на директорите е отговорен (както самостоятелно, така и съвместно с останалите) за жизнеспособността на дружеството и бъдещия му успех. Следователно отговорността на председателя е фундаментално различна от тази на висшия ръководител на организацията, защото там, където мениджърът споделя отговорността с другите, председателят в крайна сметка е отговорен за цялата компания. Важно е да се подчертае, че тази отговорност е към компанията, а не към акционерите. Ако мнозинството от акционерите не са съгласни с решенията на Борда на директорите, тези акционери обикновено нямат правата да променят директно това решение.

ГИС БАЗА-ДАННИ ПО ПРОЕКТ *SMART INTEGRATED DEVICES FOR TELEMEDICINE TO COMBAT COVID-19 TOWARD NEW RESILIENCE CITY*

Георги Желев, Лачезар Филчев, Мария Димитрова, Пламен Тренчев, Милен Чанев

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

Ключови думи: *ГИС база данни, COVID-19, IQAir, замърсяване на въздуха, фини прахови частици*

Резюме*: Географските информационни системи предоставят възможност за оценка на риска свързан с различни рискови фактори, картографиране на различията, също за сравнения на карти на заболявания. Чрез използване на пространствени данни могат да се създадат здравни модели и чрез тях много по-добре да разберем рисковете за здравето възникващи за населението.Създадена е ГИС базата данни за избрани тестови райони – гр. София и гр. Бургас, включваща референтни данни, спътникови данни (метеорологични данни, данни за атмосферно замърсяване), данни за заболяемост от COVID-19 и данни от наземни измерванията със сензори на IQAir. Базата данни е основа за провеждания непрекъснат мониторинг на чистотата на въздуха в двата района. Анализирана е взаимовръзката между атмосферното замърсяване и заболеваемостта от COVID-19. Създадена е мрежа от сензори за отчитане на финитe прахови частици в дадените райони.*

GIS DATABASE BY PROJECT *SMART INTEGRATED DEVICES FOR TELEMEDICINE TO COMBAT COVID-19 TOWARD NEW RESILIENCE CITY*

Georgi Jelev, Lachezar Filchev, Maria Dimitrova, Plamen Trenchev, Milen Chanev

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

Keywords: *GIS database, COVID-19, IQAir, air pollution, fine particulate matter*

Abstract: *Geographic information systems (GIS) facilitate the evaluation of risk associated with various risk factors, the mapping of differences, and the comparison of disease maps. The utilization of spatial data facilitates the development of health models, thereby enhancing the comprehension of population health risks. A Geographic Information System (GIS) database has been developed for specific test areas, namely Sofia and Burgas. It includes reference data, satellite data (meteorological data and atmospheric pollution data), COVID-19 incidence data, and data from ground measurements using IQAir sensors. The database serves as the foundation for the continuous monitoring of air quality in the two areas. A close examination of the relationship between air pollution and the incidence of the novel coronavirus disease (COVID-19) has been conducted. A network of sensors has been established to assess the levels of fine particulate matter in specific regions.*

Въведение

От голямо значение за смекчаването на последиците и с цел управление на заболеваемостта от COVID-19 са данните свързани с пространствено-времевата динамика на заболяването. Този вид данни показва степента и въздействието на заболеваемостта същевременно са от голяма полза при взимането на решения, планирането и действията по отношение смекчаването на въздействието заболяването [1]. През последните години здравната и медицинска география получават голямо развитие. Така също те се явяват като критични научни дисциплини заради интердисциплинарният им характер. Това е така тъй като те интегрират в себе си пространствения анализ с общественото здраве, епидемиологията и

социалните науки. От голямо значение е разбирането, че пространствените или географските измерения на здравето, спомагат за справяне със съвременните предизвикателства пред общественото здраве и насърчаване на по-здравословни общности [2]. Знаейки, че взаимодействието между географските фактори и общественото здраве е от изключителна важност, тъй като те помагат изследванията в медицината и глобалното здраве. Използвайки различни видове пространствени данни ние имаме възможност да създадем здравни модели с помощта, на които много по-задълбочено да разберем рисковете за здравето възникващи за населението на дадена територия бе значение от нейната площ и броя на населението ѝ [3].

Разбирането на пространствено-времевата динамика предоставя важна информация, както за епидемиолога така и за клиницист [4]. Географските информационни системи (ГИС) в комбинация с медицинската география спомагат за прилагането на методи и техники за справяне с пространствените проблеми в болестите и медицината [5]. Географските информационни системи намират приложение за оценка на риска произтичащ от околната среда, картографиране на различията за сравнения на карти на заболявания и други рискови фактори [6]. Освен това ГИС намира и приложение за представяне и обобщаване на сбираните данни и за измерване на социалното въздействие на COVID-19.

ГИС софтуери са използвани в редица научни изследвания които имат за цел количествено определяне на връзката между индекса на качеството на атмосферния въздух и разпределението на случаите на COVID-19. Част от пространствените данни свързани с качеството на атмосферния са получени от сателитни изображения. Установено е, че качеството на въздуха стой в основата на разпространението на COVID-19. С помощта на ГИС е извършен анализ на чувствителността, както и анализ на въздействието на концентрацията на прахови частици във въздуха връзката със смъртността в Китай. Проучването установява, пряка положителна корелационна зависимост между смъртността и концентрациите на замърсители във въздуха [7–12].

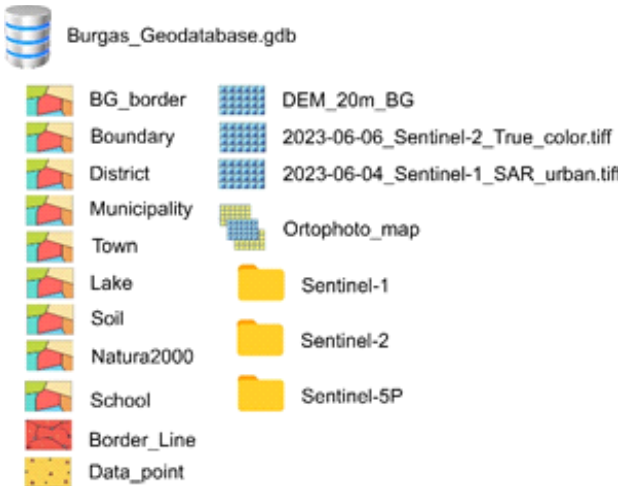
ГИС базата данни е важен фактор и незаменим инструмент при съхранението, управлението и анализ на различни по вид пространствени данни, които описва реални обекти и явления, свързани с конкретни географски местоположения. При проекти с набиране на множество данни с географска или пространствена компонента е незаменима част [13–15].

Целта на настоящия доклад е създаване и структуриране на ГИС база данни за провеждане на дистанционен мониторинг на атмосферното замърсяване с фини прахови частици и връзката му със заболеваемостта от COVID-19.

Базата данни

По проекта “Telemedicine to Combat Covid-19 Toward New Resilience City“ [16, 17] е създадена база данни в ГИС среда. Тя служи за структуриране на наличните и получаваните геопространствени данни, от една страна и за анализ, интерпретация и визуализация на резултатите от изследването. ГИС база данни е файлова база данни (*Burgas_Geodatabase.gdb*), съдържаща векторни и растерни данни от различни източници. Структурата на базата данни е показана на Фиг. 1. Тя обединява четири вида входни данни – референтни векторни и растерни слоеве, спътникови данни, данни за заболяемост от Covid-19 и данни от наземна мрежа от сензори. Следва анализ на пространствените данни и визуализиране на резултатите под формата на тематични карти, таблици и графики. Съдържанието на файловата ГИС базата данни е представена на Фиг. 2.

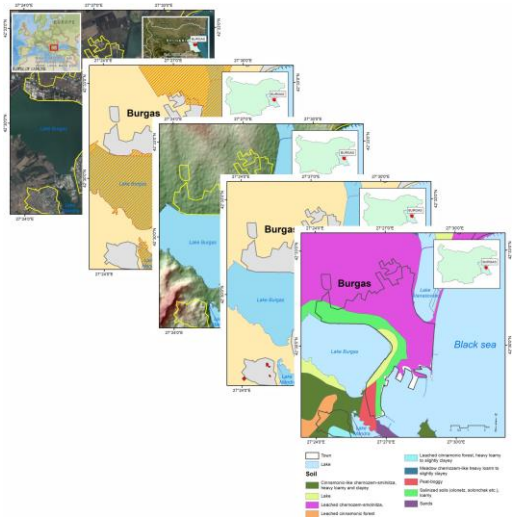
Фиг. 1. Структура на ГИС база данни



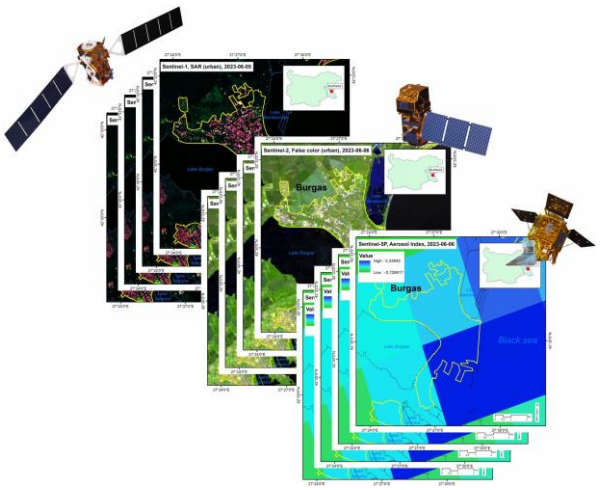
Фиг. 2. Съдържание на ГИС база данни Burgas_Geodatabase.gdb

Входната информация се базира на четири вида данни:

Референтни векторни и растерни слоеве, включват графична и атрибутивна информация за: административни граници (община и град); брегова линия; водни тела; почви; защитени зони по НАТУРА 2000; училища; кадастър; цифров модел на релефа (20 × 20 m); ортофото карта. Тези слоеве са базови за изследваните райони и включват графична и атрибутивна информация (Фиг. 3).



Фиг. 3. Референтни векторни и растерни слоеве



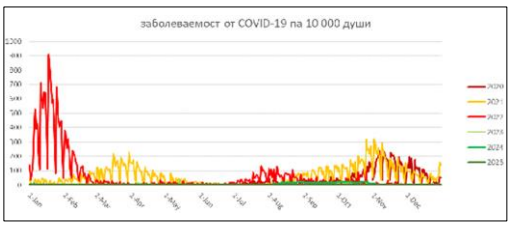
Фиг. 4. Спътникови данни от спътниците Sentinel-1, Sentinel-2 и Sentinel-5p

Спътникови данни от спътниците Sentinel-1, Sentinel-2 и Sentinel-5p се достъпват от Copernicus Browser (https://browser.dataspace.copernicus.eu) и са със свободен достъп (Фиг. 4).

Данни от заболяемост от COVID-19 се взимат от Национален Център по Заразни и Паразитни Болести (https://covid19.ncipd.org) по общини (брой на 100 000 души), (Фиг. 5).

Наземни данни от измервания получени от проведения мониторинг за качество на въздуха чрез сензори AirVisual (Фиг. 6). Сензорите регистрират следните параметри на качеството на въздуха:

- общ индексът за чистота на въздуха AQI;
- количество на праховите частици (PM2,5 μg/m³; PM10 mg/m³; Pm1 mg/m³); количество въглероден диоксид (CO_2 ppm);
- температура (C°);
- влажност (%);
- атмосферно налягане (mbar).

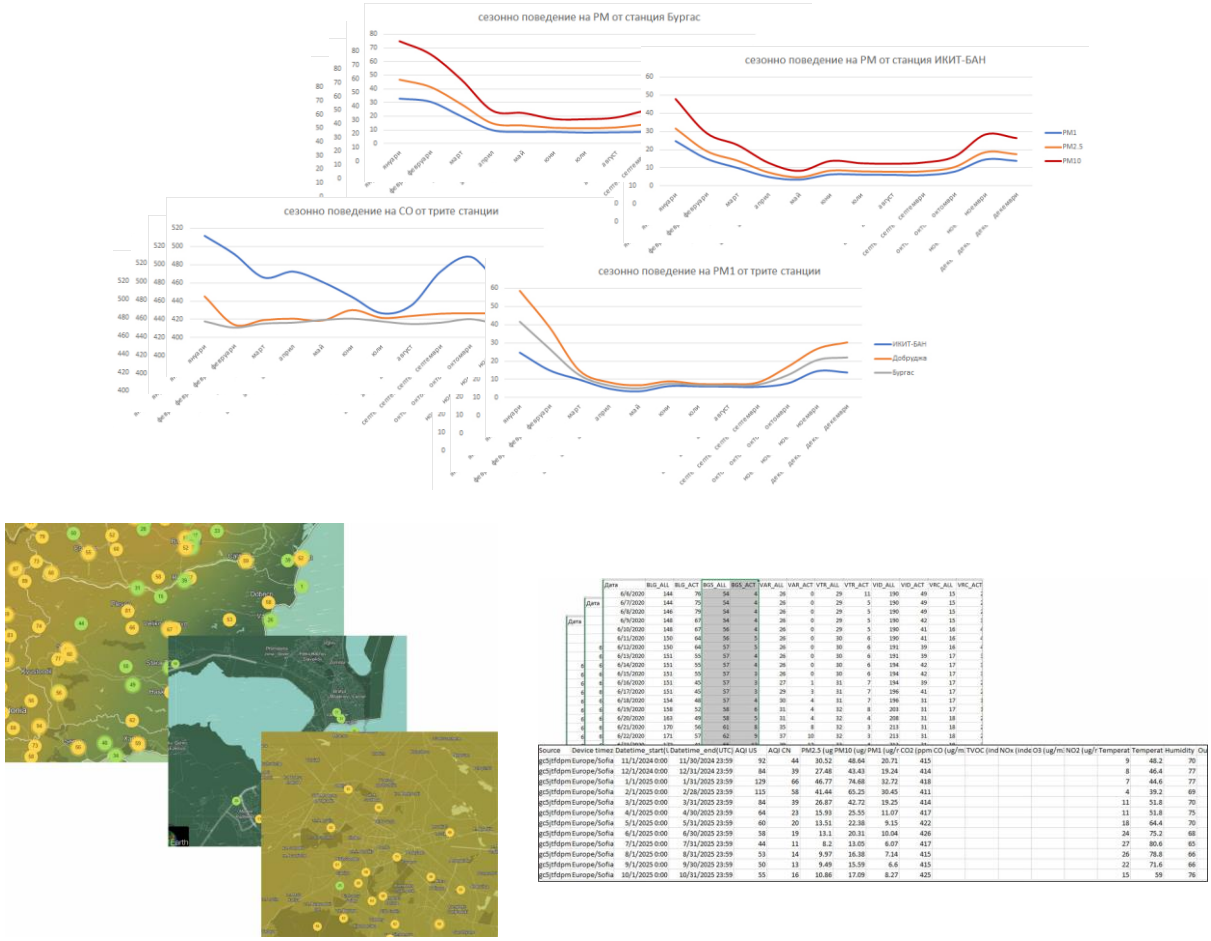


Фиг. 5. Данни от заболяемост от COVID-19

Фиг. 6. Наземни данни от измервания

Анализ и резултати

Съвместяване и обработка на слоеве дава възможност за получаване на нова информация. След анализ на входните данни, резултатите са представени като тематични карти, таблици и графики (Фиг. 7). На базата на данните от сензорите е проследено сезонното изменение на атмосферно замърсяване в двата изследвани района. Поведението на концентрацията на фините прахови частици с различни размери е подобно.



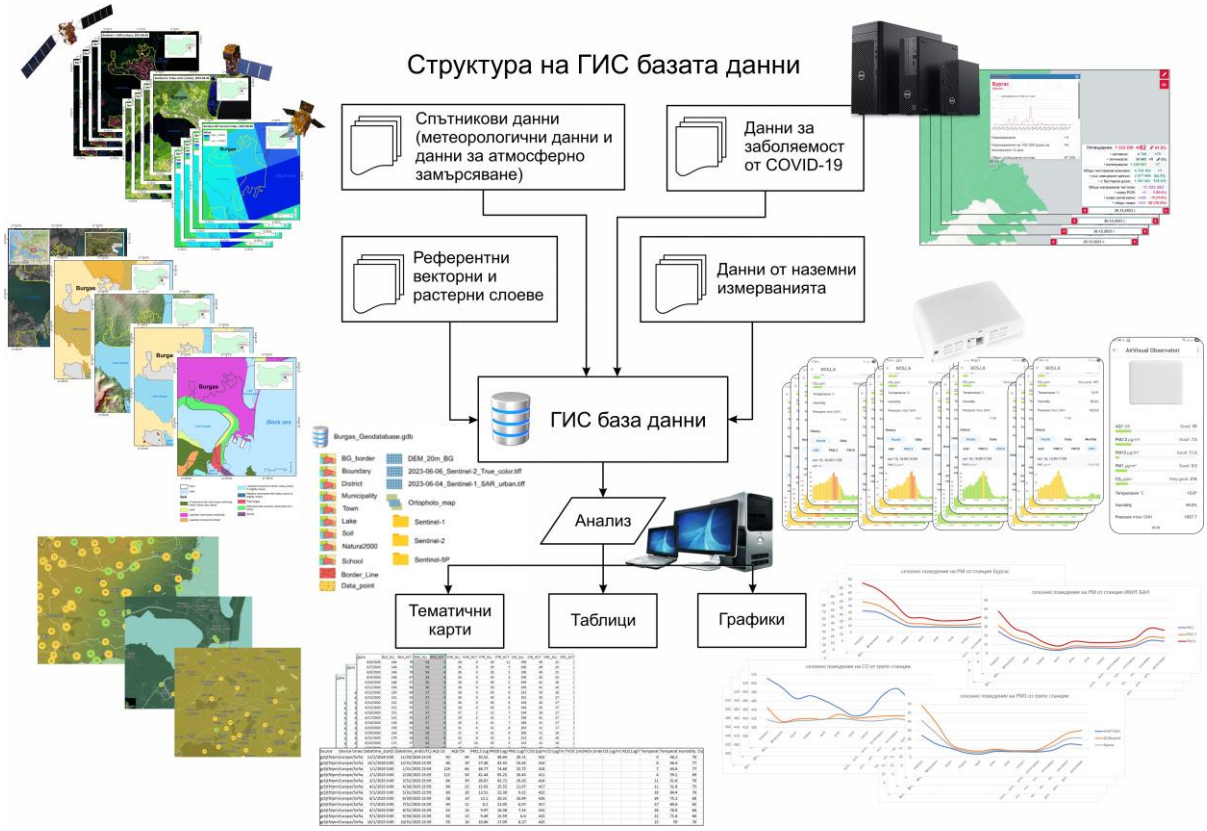
Фиг. 7. Резултати при обработка и анализ на входните данни

Заключение

В заключение можем да отбележим, че ГИС база данни е незаменим инструмент за провеждане на пространствено обвързани изследвания, чрез използване на различна по вид и от различни източници пространствена информация. Работата в ГИС среда осигурява извеждането на резултатите в графичен и табличен вид. В допълнение има възможност за получаване на картографско изображение под формата на тематични карти.

Тематичните карти могат да бъдат от голяма полза, тъй като предоставят важна информация, както за епидемиолозите. ГИС е полезен инструмент за медицинската география за съставяне на модели с помощта на които по-лесно да се справяме с проблеми свързани с болестите и медицината. ГИС намира и приложение за представяне и обобщаване на сбираните данни и многомерно мащабиране за измерване на социалното въздействие на COVID-19.

Разработеният проект (Фиг. 8) е едно практическо използване на ГИС като част от дистанционния мониторинг на атмосферното замърсяване с фини прахови частици и връзката му със заболеваемостта от COVID-19 в два района от територията на страната.



Фиг. 8. Обща схема, дейности и резултати в ГИС базата данни

Благодарности:

Изследването е извършено в рамките на проект „Smart Integrated Devices for Telemedicineto Combat COVID-19 Toward New Resilience City“ (Smart4COV19/ Telemedicine), договор КП-06-Д002/8/2021 между ИКИТ-БАН и Фонд „Научни изследвания“ към Министерството на образованието и науката по програма SEA-EUROPE JFS.

Литература:

1. Franch-Pardo, I., Napoletano, B. M., Rosete-Verges, F., & Billa, L. (2020). Spatial analysis and GIS in the study of COVID-19. A review. Science of the total environment, 739, 140033. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140033
2. Islam, N., Alam, A., Basak, A., Das, U., Rukhsana (2024). Development of Health and Medical Geography: A Systematic Review. In: Alam, A., Rukhsana, Biswas, S., Islam, N., Roy, R. (eds) Population, Environment and Disease. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67624-6_1
3. Rakuasa, H. (2023). Dynamics of Medical Geography Development in Indonesia: Exploring the Interaction between Geographical Factors and Public Health. Nusantara Journal of Behavioral and Social Science, 2(3), 81–86. https://doi.org/10.47679/202337
4. Löytönen, M. (1998). GIS, time geography and health. In GIS and health (pp. 115-128). CRC Press.
5. Meade, M. S., & Emch, M. (2010). Medical geography. Guilford Press.
6. Gesler, W. (1986). The uses of spatial analysis in medical geography: a review. Social science & medicine, 23(10), 963-973. https://doi.org/10.1016/0277-9536(86)90253-4
7. Fan, C., Li, Y., Guang, J., Li, Z., Elnashar, A., Allam, M., & de Leeuw, G. (2020). The impact of the control measures during the COVID-19 outbreak on air pollution in China. Remote Sensing, 12(10), 1613. https://doi.org/10.3390/rs12101613
8. Xu, H., Yan, C., Fu, Q., Xiao, K., Yu, Y., Han, D., Wang, W., & Cheng, J. (2020). Possible environmental effects on the spread of COVID-19 in China. Science of the Total Environment, 731, 139211. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139211
9. Zhang, Z., Xue, T., & Jin, X. (2020). Effects of meteorological conditions and air pollution on COVID-19 transmission: Evidence from 219 Chinese cities. Science of the total environment, 741, 140244. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140244
10. Yao, Y., Pan, J., Wang, W., Liu, Z., Kan, H., Qiu, Y., Meng, X., & Wang, W. (2020). Association of particulate matter pollution and case fatality rate of COVID-19 in 49 Chinese cities. Science of the Total Environment, 741, 140396. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140396
11. Ahasan, R., Alam, M. S., Chakraborty, T., & Hossain, M. M. (2022). Applications of GIS and geospatial analyses in COVID-19 research: A systematic review. F1000Research, 9, 1379. https://doi.org/10.12688/f1000research.27544.2
12. Асенова, М., 2010. Специализирани приложения на ГИС при създаване на информационна система за горите. Управление и устойчиво развитие 1/2010 (25), стр. 243–248
13. Желев, Г., Стефанова, Д., Стефанов, П., Бонев, Д., Стоянова, А., Чолакова, Д. ГИС проект за изследване на карста в Р. България. Годишник на департамент „Природни науки“, 2018–2019, НБУ, 2020, ISSN:2367-6302, 54–59
14. Недков, Р., Руменина, Е., Желев, Г. Интегрирана ГИС за мониторинг на зелените площи на град Пловдив с използване на спътникови данни с висока разделителна способност. Proceeding of the First Scientific Conference with International Participation “Space, Ecology, Safety” (SES'2005), Varna, Bulgaria,, Book II, SRI-BAS, 2005, ISSN:954-438-484-7, 155–160
15. Желев, Г. Структура на ГИС – проект за геоморфоложко изследване на Стръмниришката вулкано-тектонска морфоструктура. Девета национална конференция с международно участие по съвременни проблеми на слънчево-земните въздействия, София,, STIL-BAS, 2002, 133–136
16. Filchev L., M. Dimitrova, Pl. Trenchev, G. Jelev, M. Chanev. The impact of air pollution on the spatial distribution of Covid-19 across Bulgaria: a study using satellite and in situ data. Proc. SPIE 13816, Eleventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2025), 2025, ISBN:978151069531, ISSN:1996-756X, https://doi.org/10.1117/12.3073135
17. Filchev, L., Dimitrova, M., Trenchev, P., Chanev, M., Jelev, G. From Space to Health: The Impact of Earth Observation Research on the Smart4COV19 Telemedicine project. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1418, IOP Publishing, 2024, ISSN: I1755-1315 https://doi.org/10.1088/1755-1315/1418/1/012049

Session 5

Space Material Science and Nanotechnology

Chairmen: Prof. Dimitar Teodossiev

Secretary: Assoc. Prof. Adelina Miteva

ТРИБО-МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА ЗАЩИТНИ Ti-ПОКРИТИЯ

Петя Табакова, Анна Петрова, Корнели Григоров

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: tangrascorp@gmail.com; ani@phys.bas.bg; kgrigoro@abv.bg

Ключови думи: *Тънки защитни слоеве, адхезия, еластичност*

Резюме: *Настоящото изследване има за цел да разгледа свойствата на покрития, състоящи се от многослойни, защитни тънки слоеве, с дебелина до 3 μm и изразен градиентен характер на състава от T_i-карбо-нитриди. Избраните покрития осигуряват твърдост над 30 GPa, като същевременно поддържат достатъчно нисък коефициент на триене (КОФ) и добра адхезия със субстрата. Покритията са нанесени чрез метода на физическо отлагане на пари (PVD). Адхезията е важно качество и настоящото изследване показва, че на границата двата модула на Юнг на съседните материали трябва да са близки по стойност.*

TRIBO-MECHANICAL PROPERTIES OF PROTECTIVE Ti-ПОКРИТИЯ

Petya Tabakova, Anna Petrova, Korneli Grigorov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: tangrascorp@gmail.com; ani@phys.bas.bg; kgrigoro@abv.bg

Keywords: *Protective thin layers, adhesion, elasticity*

Abstract: *The present study examines the properties of coatings consisting of multilayer, protective thin layers, with a thickness of up to 3 microns and a pronounced gradient character of the composition of Ti-carbo-nitrides. The selected coatings provide hardness above 30 GPa, while maintaining a sufficiently low coefficient of friction (FC) and good adhesion to the substrate. The coatings were applied by the physical vapor deposition (PVD) method. Adhesion is an important quality and our study shows that at the interface, the two Young's moduli of the adjacent materials should be close in value.*

Въведение

Процесите, влошаващи структурата на материалите, особено в сектори като аерокосмическата, автомобилната, морската, строителната и енергийната промишленост са в резултат на температурни колебания в широки граници, слънчева радиация и процеси водещи до корозия. Те причиняват икономически загуби, намаляващи безопасността и повишаващи изискванията за поддръжка при работата на машините и апаратурата.

При механични системи (наличие на движения в машините, инструментите и тръбопроводите), покритията могат да играят роля на 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 стойности на коефициента на триене (КОФ). Разновидности на диамантоподобни въглеродни (DLC) слоеве и керамични покрития, са предпочитани в такива среди поради комбинираната им способност да устояват на износване и корозия.

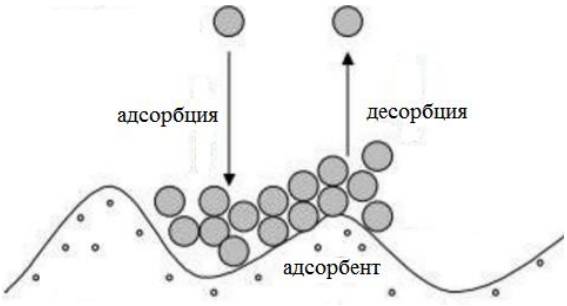
Корозията в космическата индустрия намалява структурната цялост и се налага да се контролира, за да не доведе до повреди.

Отлагането на многокомпонентни градиентни слоеве е водеща технология в материалознанието. Подреждането на такава многослойна структура на повърхността на материалите води до композитна модифицирана структура с подобрени механични и трибологични и най-вече подобрени адхезионни свойства.

В автомобилната индустрия, при висока влажност и третиране на пътищата със соли и луга, се намалява продължителността на живота и производителността на превозните средства.

В морска среда се наблюдава разграждане на стоманени конструкции, корабни платформи и плавателни съдове. Нефтопроводи, газопроводи и инфраструктурата, свързана с енергетиката също са изложени на корозионни процеси, водещи до аварии, прекъсване на работата и екологични бедствия.

В индустрията апаратурата и детайлите работят в широк температурен интервал от -200ºС до +400ºС и нагоре. Наблюдават се сложни процеси, зависещи от много фактори, действащи едновременно. При високи температури се променят якостните свойства на материалите. Активират се процеси като дифузия и десорбция (Фиг. 1).



Фиг. 1. Схематично представяне на адсорбция и десорбция

Коефициентът на триене (Таблица 1) при добавка на Ag, Cu, Fe в материалите намалява [1]. Наличието на тези елементи, както и повишени температури, отново рязко увеличава триенето. Малки добавки от Ni, Mo, P и др. в материала водят до подобряване на триенето и намаляване на КОФ [2].

Таблица 1. КОФ за материали. Сравнение на TiN и TiCN слоеве

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

Основните подходи за корозоустойчивост са отлагане на покрития с бариерни свойства.

Наноструктурираните и градиентни покрития, полимерно-керамичните хибридни слоеве и самовъзстановяващите се защитни слоеве допълнително подобряват издръжливостта и живота на материалите.

Тази статия има за цел да предостави информация за иновативни защитни покрития, които могат да се прилагат в промишлени условия.

Добрите механични и трибологични свойства на TiX мултислойни покрития ги превръщат в популярен избор за повърхностна обработка.

Слоевете титанов-карбонитрид (TiCN) съчетават свойства като висока твърдост, висока термична стабилност и подобрена износоустойчивост [3].

Карбидите на преходните метали (група химични елементи, разположени в средата на периодичната система, между групи 3 и 12, проявяващи променлива валентност), включително титановият карбид (TiC), имат много голям диапазон на стабилност и значително количество

въглеродни ваканции. Те се характеризират с ниска топлопроводимост, висока точка на топене, висока твърдост и изразена нестехиометрия, което дава възможност за моделиране на физичните свойства на слоевете без структурни преходи.

Слоевете титанов нитрид (TiN) притежават висока твърдост.

PVD и CVD са двете техники, чрез които се отлагат твърди покрития. Тези методи имат различни предимства и недостатъци, когато става въпрос за защита от корозия.

PVD процесите включват физическа реакция, като 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 μm. 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 в прецизни приложения, като декоративни, оптични покрития и износоустойчиви покрития. По-нови техники, като магнетронно разпрашване с висока мощност (HIPIMS), подобряват плътността и адхезията на PVD покритията и по този начин повишават техните защитни способности.

По метода на CVD се отлагат покрития като продукт на химична реакция на газообразни прекурсори върху нагрят субстрат. Това е отлагане при относително висока температура над 800 °C, въпреки че това ограничава избора на субстрата. CVD покритията в сравнение с PVD, обикновено са по-дебели (25–75 um), по-плътни и безпорести. Самата природа на тази плътна и здрава структура осигурява по-добра устойчивост на агресивни среди. CVD метода се използва при покриване на сложни геометрични форми (достига до области, които с линия на видимост не може да покрие) и вътрешни повърхности, постигайки равномерна дебелина [4].

Като се има предвид, че тези процеси позволяват отлагането на метални или неметални филми с висок контрол върху дебелината, състава, микроструктурата и адхезията, те стават важни за подобряване на бариерните свойства и методите за активна защита.

В [5] авторите са установили, че КОФ на TiAlN не показва големи разлики при отлагане по различни технологии и повечето от TiAlN покритията, описани в литературата, имат КОФ между 0.6 и 0.8 при основа WC-Co.

Прави впечатление, че 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 слоеве, отложени върху алуминиев окис (монокристална структура) и в контакт с чист Al, ъглите на омокряне са в диапазона 80–100° при температури до 1273 K. В случай на окислен Al, обикновено при T < 1173 K, омокряемостта и адхезията са значително намалени. При тези температури може да протече реакция между разтопения Al и TiAlN, което прави TiAlN слоя на границата богат на Al.

Експериментални данни

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.

Разглеждаме образци от WC:

- с Co (8%), покрит с TiCN;
- с Co, Mn, T_iN, покрит с TiC;
- с Co, Mn, T_iN, покрит с TiN.

Преди закрепване на образците във вакуумната камера, подложките са почистени в ултразвукова вана и обезмаслител, измити с дестилирана вода и изсушени.

Вакуумната камера е оборудвана с два въртящи се цилиндрични катода, триосен планетарен механизъм за закрепване на образци, резистивен нагревател, йонен източник за предварително почистване на образците и мас-флоу контролери за натичане на газовете. Слоеве от TiCN са получени чрез изпарение на Ti при температура 430 °C.

За постигане на добра адхезия към подложките е извършено почистване в тлеещ разряд от аргон, последван от бомбардиране на повърхността с титанови йони при подадено отрицателно напрежение към подложките от 1000 V.

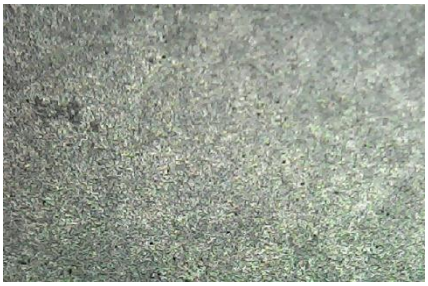
Отложените слоеве са анализирани по отношение на тяхната структура и химичен състав.

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 дефундирането на атоми и молекули през тях.

a)

b)

c)



d)

Фиг. 2. Металографски анализ: a) Образец с TiN покритие; b) Топография на TiN покритие; c) Образец с TiCN покритие; d) Топография на TiCN покритие

TiN- покритието е стабилен до 600 °C с HV2000, TiCN - HV3000 и устойчивост до 900 °C (Таблица 2). В Таблица 2 могат да се видят и Модулите на Юнг.

Таблица 2. 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- покритието има по-ниска химична активност с Fe и други метални субстрати заради наличието на C. Това го предпазва от дифузия на C, O и N (при инструменти от WC- Co и стомани) в контакт, 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 3. Сравнение на T_iN и T_iCN слоеве

Характеристики	**TiN**	**TiCN**
Кристална структура	Кубична (тип NaCl)	Кубична (тип NaCl), но съдържа C в решетката
Твърдост HV	~ 2000	~ 3000
Плътност [g/cm³]	7.3	6.68
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 дифузионен бариер (Фиг. 2)	Забавя износването чрез дифузия (Фиг. 2a)	Силно ограничава дифузията, особено при високи температури (Фиг. 2b)
КОФ	Малък	Много малък

От друга страна, в градиентните покрития могат да се наблюдават структурни промени и/или фазоотделяне, което води до подобрение на омокряемостта и адхезията [6].

Заключение

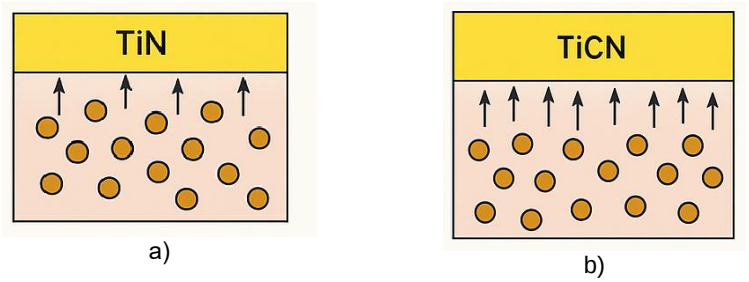
Плътната кристална решетка, химична стабилност и ниска порьозност блокират движението между повърхността и субстрата, като намаляват разрушителните процеси като окисление, дифузия и прегряване при работни температури на режещи инструменти.

TiN покритието е с висока твърдост и ниско триене, но при високи температури дифузията на атоми се задейства. TiCN покритието подобрява твърдостта, 0.2 КОФ (добро поведение при рязане и пробиване). Наличието на C в структурата възпрепятства Fe, O, Co и N и увеличава устойчивостта срещу дифузия при високи температури (Таблица 3). Ефектът на многослойна структура, с различни коефициенти на дифузия в слоевете възпрепятстват атомите.

За инструменти за трудна обработка, виски температури и агресивни среди. TiCN е подходящо покритие.

TiN покритието осигурява дифузионна бариера при средни температури и базова защита (Фиг. 3a), а TiCN- покритието е ефективна бариера при високи (Фиг. 3b).

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 (необходимост от допълнителни бариерни интерслоеве като аморфни слоеве като CrN,Ti_2B, WC/WC_xN_y).



Фиг. 3. Схематично представяне на дифузионни бариери: a) TiN; b) TiCN

В заключение можем да отбележим, че изборът на покритие от TiC, TiN и TiCN като материал 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. Peng, T., Yan, Q., Li, G., Zhang, X. The Influence of Cu/Fe Ratio on the Tribological Behavior of Brake Friction Materials. Tribology Letters, vol. 66, article number 18, 2018, https://doi.org/10.1007/s11249-017-0961-2
2. Wang, C., Gao, Y., Zeng, Z., Fu, Y. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al. Journal of Alloys and Compounds, vol. 727, 278-285, 2017, https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.101
3. Fouad, O., Lin H.-Y., Shah, S. Reactively Magnetron Sputter-Deposited Ti (C,N) Nanocomposite Thin Films: Composition and Thermal Stability. Journal of Coating Science and Technology, vol. 5(2), 42–49, 2018 http://www.lifescienceglobal.com/journals/journal-of-coating-science-and-technology
4. Konstantiniuk, F., Schiester, M., Tkadletz, M., Czettl, C., Schalk, N., Annealing activated substrate element diffusion and its influence on the microstructure and mechanical properties of CVD TiN/TiCN coatings, Surface and Coatings Technology, vol. 488, 131079, 2024, https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131079
5. Li, X., Li, G., Lü, W., Liu, S., Li, C., Wang, Q. Controllable high adhesion and low friction coefficient in TiAlCN coatings by tuning the C/N ratio, Applied Surface Science, vol. 597, 153542, 2022, https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153542
6. Tabakova, P., Petrova, A., Avdeev, G., Slavov, D., Massi, M., Monezi, C., Grigorov, K. Hardness influence on the adhesion of thin protective coatings for aerospace applications. J. Phys.: Conf. Ser., National Forum on Contemporary Space Research 2024 (NaFSKI V), 3116, 012006, 17426596, 2025, doi:10.1088/1742-6596/3116/1/012006

S E S 2 0 2 5
Twenty-first International Scientific Conference
SPACE, ECOLOGY, SAFETY
21 – 25 October 2025, Sofia, Bulgaria

ИЗСЛЕДВАНЕ НА Cu-СПЛАВ С РЕНТГЕНОВА ФОТОЕЛЕКТРОННА СПЕКТРОСКОПИЯ

Петя Табакова, Анна Петрова, Корнели Григоров

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: tangrascorp@gmail.com; ani@phys.bas.bg; kgrigoro@abv.bg

Ключови думи: *XPS, Cu-сплави, самосмазващи се материали, триене*

Резюме: *Износването на машинните детайли е основен проблем в автомобилната и аерокосмическата промишленост. Изборът на материал с високи механични и трибологични свойства определя тенденциите в съвременните технологии. Сред самосмазващите се композитни материали интерес представляват Cu-сплавите, подсилени с частици със смазочни свойства като Pb, Sn, Ni,Sb и Mo. С повишаване на работните температури се образуват повърхностни и подповърхностни слоеве. Разглеждаме промяната на структурата на повърхността и динамиката на химичните елементи.*

STUDY OF Cu-ALLOY WITH X-RAY PHOTOELECTRON SPECTROSCOPY

Petya Tabakova, Anna Petrova, Korneli Grigorov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: tangrascorp@gmail.com; ani@phys.bas.bg; kgrigoro@abv.bg

Keywords: *XRD, Cu-alloys, self-lubricating materials, friction*

Abstract: *Machine wearing is a major problem in the automotive and aerospace industries. The materials with high mechanical and tribological properties determines the trends in modern technologies. Among self-lubricating composite materials, Cu-alloys reinforced with particles with lubricating properties such as Pb, C, Sb, Mo are of interest. As operating temperatures increase, surface and subsurface layers form. We study the change in surface structure and the dynamics of chemical elements.*

Въведение

За откриването на рентгеновата фотоелектронна спектроскопия през 1981 г. шведския физик Кай Мане Бьоре Сигбан печели Нобелова награда по физика, която разделя с още двама учени. В химията, методът е известен като ESCA - електронна спектроскопия за химичен анализ (electronic spectroscopy for chemical analysis).

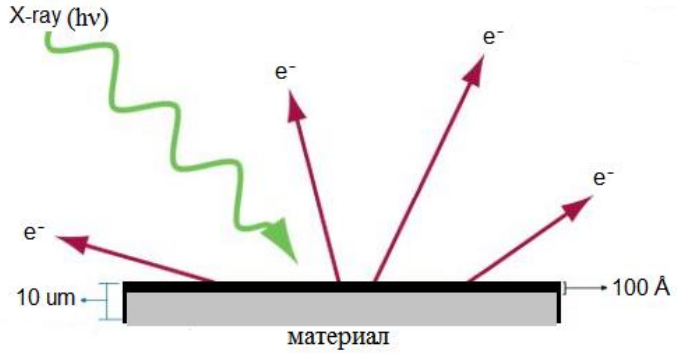
Рентгеновата фотоелектронна спектроскопия (РФС на български и XPS на английски), известна още като фотоемисионна спектроскопия, е аналитичен метод за определяне на количествения атомен състав на повърхностността на материалите, при който сноп монохроматични рентгенови лъчи избиват от повърхността на изследвания образец фотоелектрони.

Теория на метода

Енергиите на излъчените електрони са характерни за присъстващите елементи, както и за химичните връзки или степента на окисление на елементите. Количеството на излъчените фотоелектрони от даден химически елемент е пропорционално на неговата концентрация и фактора на чувствителност на детектора към дадената дължина на вълната. Дълбочината на проникване на рентгеновите лъчи достига до няколко микрона (Фиг. 1), като фотоелектроните,

създадени чрез директно йонизиращо рентгеново лъчение, достигат до детектора само от повърхностните 100 Å.

XPS е техника за изучаване на елементния и химически състав. Използва се още за профилиране – определяне на атомния състав на химичните елементи като функция от дълбочината.



Фиг. 1. Схематично представяне на процеса при XPS

Всяко енергийно ниво на даден химичен елемент има специфична енергия на свързване, необходима за откъсване на електрона от атома. Връзката (1) между енергията на рентгеновите лъчи (hv), кинетичната енергия на излъчените електрони ($E_к$) и енергията на свързване (BE) на електроните е следната:

(1) $$BE = hv\text{-}E_к\text{-}\varphi$$

Необходимо е да се знае и работния параметър на спектрометъра φ.

Елементният анализ става възможен чрез измерване на кинетичната енергия на фотоелектроните. Енергията на свързване на елементите варира в зависимост от състоянието. Тя ни дава информация дали даден елемент съществува самостоятелно или в съединение, като може да се наблюдава изместване в позицията на фотоелектронния пик [1].

Таблица 1. Отделителна работа на анализираните от нас химични елементи

Елемент	Отделителна работа [eV]
Al	4.08
Fe	4.50
Pb	4.14 – 4.25
Sn	4.16 – 4.25
Cu	4.50

При работа с XPS започваме стандартно със сканиране на пълния енергиен диапазон. Следователно можем да идентифицираме:

- елементите от повърхността;
- състоянието на свързване;
- позицията и формата на пика;
- за определяне състава в дълбочина, тъй като той дава представа за процесите, които са наблюдават в повърхността на материала.

Според уравнението на Айнщайн за фотоефекта, сумата от енергията на свързване на излитащия електрон (отделителната му работа) (Таблица 1) и кинетичната му енергия е равна на енергията на падащия фотон hv, където h е константа на Планк, v – честота на падане. По спектъра на излитащите електрони може да се определят техните енергетични нива в свързано състояние на материала. Като падащо лъчение се използват монохроматични рентгенови или ултравиолетови лъчи с енергия от 10 000 до 10 eV, съответстващи на дължината на вълната от няколко до стотици nm. Енергията на фотоелектроните се измерва с електронни спектрометри, с висока разделителна способност до 10 eV в рентгеновата област и до стотни от eV в ултравиолетовата област.

Предимства и недостатъци на XPS за анализ на повърхности

Предимства:

- Неразрушителен
- Повърхностно чувствителен (10–200 Å)
- Всички елементи (с изключение на H и He)
- Количествен анализ
- Дава информация за химичните връзки
- Лесна интерпретация на получените резултати, водещи до разбиране процеси, протичащи в експериментално синтезирани материали, покрития и слоеве
- Получаваме високо информационно съдържание

Недостатъци:

- Площта за изследване е сравнително малка
- Това е сравнително скъп метод
- Изисква се висок вакуум (10^{-8} до 10^{-11} Torr)
- Бавен - 1/2 до 8 часа на проба
- Зареждането и референтните енергии могат да бъдат проблем
- Ниска разделителна способност (0.1–1.0 eV)

МАТЕРИАЛ

С повишаване на температурата при работа на материалите, триенето се увеличава и коефициентът на триене (КОФ) спада значително. XPS беше използвана за определяне на концентрацията на повърхностните елементи и тяхното химично състояние. Последното е важно, защото се образуват нови елементи и окиси, които подобряват трибологията in situ.

a) b)

Фиг. 2. Изследвани образци: a) Еталон – проба 1; b) Cu-сплав с добавка Pb, P и Sb – проба 2

Разглеждаме медни образци. Проба 1 е еталонен образец от чиста мед (Фиг. 2a). Проба 2 е Cu-сплав с добавка Pb, P и Sb, получена чрез методите на праховата металургия (Фиг. 2b) [2–5].

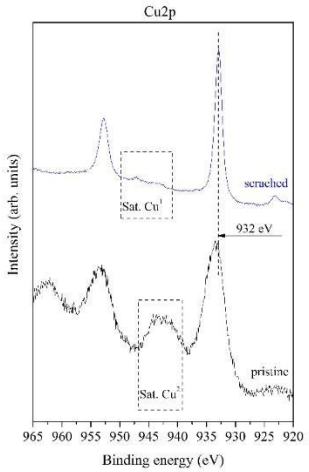
Експериментални данни

Анализите се извършват в две точки за всяка проба. Първата точка се избира в гладката част на образеца, а втората - в грапавата област, където е направено трибологичното измерване на коефициента на триене. Пробите се почистват фино чрез отнемане на повърхностния слой с шкурка SiC (P2000) във вакуум, без да се разрушат химичните връзки по отработена процедура.

Спектърът на гладката повърхност показва обогатяване с Cu^{2+} йони, като се вижда пик при 933.2 eV, придружен от ясно изразен сателит в диапазона 937-948 eV. Наличието на следи от азот и сяра предполага, че Cu^{2+} може да са част от съединение (Фиг. 3). Синьо маркираният пик при 932.2 eV, със сателит с нисък интензитет в диапазона 940-950 eV, е характерен за окислено състояние на Cu^{1+}.

Cu2p спектърът в надрасканата част на проба 1 (Фиг. 3) показва значително изместване. Основният пик на Cu2p сега е при 932.8 eV, с ниско интензивен сателит в диапазона 940-950 eV, което потвърждава наличието на Cu^{1+} йони (39.49 at.%). Изместването от 0.7 eV предполага отстраняване на Cu_2O частици, образувани след окисление при излагане

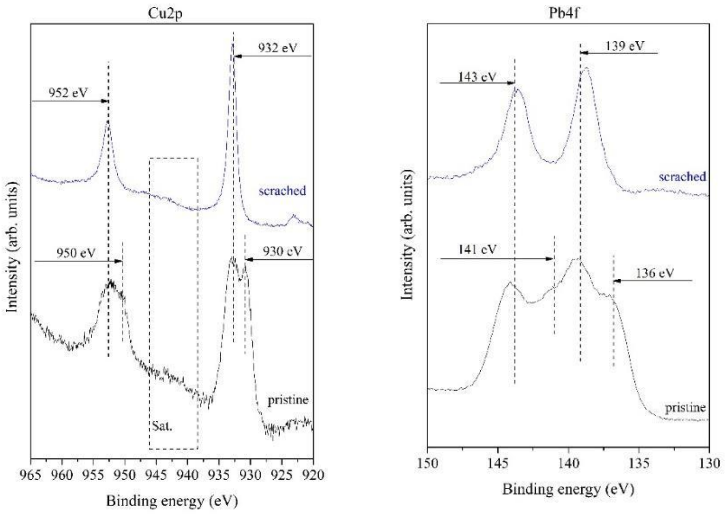
на въздух. Непокритата повърхност се състои от C-H-N-O комплекс, свързан с медния субстрат, което е в съответствие с предишни изследвания.



Фиг. 3. XPS на еталонен образец 1 за гладка и надраскана повърхност

Фиг. 4 представя спектрите на гладката повърхност в сравнение с надрасканата повърхност на проба 2. Чистата проба показва множество дублетни пикове в спектрите на ниво ядро Cu2p (Фиг. 4a) и Pb4f (Фиг. 4b), което показва различни степени на окисление (сини и зелени криви).

Детайлно изследване показва наличието на поне един горен слой, който е с различен заряд в сравнение с обемната проба и това може да е свързано с наличието на Pb_2O на повърхността. Въз основа на енергията на свързване и формата на пиковете, медта в чистата проба е предимно в окислено състояние Cu^{1+} (1.6 at.% за единия от слоевете и 2.15 at.% за другия слой) (Фиг. 4a). Освен това, това се подкрепя и от наличието на сателит с ниско интензивно разклащане в енергийния диапазон 938-948 eV.



a) b)

Фиг. 4. XPS на образец 2:
a) Спектър на енергийните пикове на Cu; b) Спектър енергийните пикове на Pb

Оловният компонент изглежда е смес от окислени състояния на Pb^0, Pb^{2+} и Pb^{4+}, въпреки че точните им пропорции не могат да бъдат определени.

Оценка след процедура за напасване на крива показва 4.90 и 7.10 at.% за всеки от не контактните слоеве.

След механично отстраняване на горния слой, спектрите на Cu2p и Pb4f претърпяват значителни промени (Фиг. 4b, надраскана област). Пикът на Cu2p вече се наблюдава при

932.5 eV, с ниско интензивна сателитна структура в диапазона 940–950 eV, характерна за състоянието Cu^{1+} (6.80 at.%) [1].

Таблица 2. Концентрация на елементите на повърхността и BE след фитване на C1s, O1s и Cu2p и окисните състояния на образец 1; Концентрациите и BE на C1s, O1s, Pb4f и Cu2p за спектрите и състоянията им за образец 2

Образец 1 (гладка повърхност)									
	C 1s				**O 1s**	**-**		**Cu2p**	
[at. %]	70.50				21.71	-		**7.52**	
[at. %]	15.45	41.74	13.31		21.71	-		1.61	5.91
BE [eV]	283.7	285.0	287.7		530.0 531.8 533.0	-		932.2	933.2
Образец 1 (надраскана повърхност)									
[at. %]	41.25				19.25	-		**39.49**	
[at. %]	-	22.64	15.58	3.03	19.25	-		39.49	-
BE [eV]	-	285.0	285.8	288.4	530.9 532.1 534.3	-		932.9	-
Ox. state	-	C-C H-C	C-O	C=O H-C=O		-		Cu^{1+}	Cu^{2+}
Образец 2 (гладка повърхност)									
-	**C 1s**				**O 1s**	**Pb4f**		**Cu2p**	
[at. %]	56.80				27.43	**12.00**		**3.75**	
[at. %]	7.84	**42.95**	-	6.01	27.43	**4.90**	**7.10**	1.60	2.15
BE [eV]	282.5	285.0	-	288.8	529.2 531.7	136.7	139.2	930.5	932.9
Образец 2 (надраскана повърхност)									
[at. %]	57.63				32.31	**3.25**		**6.80**	
[at. %]	-	**36.10**	14.92	6.61	32.31	**0.48**	**2.77**	-	6.80
BE [eV]	-	285.0	286.5	288.9	530.0 531.5 533.1	137.2	138.4	-	932.5
Ox. state	-	C-C H-C	C-O	C=O H-C=O	-	Pb^{3+}	Pb^{4+}	-	Cu^{1+}

Спектърът на Pb4f се променя значително, което позволява по-прецизно определяне на окислените състояния на оловото. Анализът, чрез напасване на кривата, разкрива два дублета с BE от 137.2 eV и 138.4 eV, съответстващи на окислени състояния на Pb^{3+} (0.48 at.%) и Pb^{4+} (2.77 at.%).

Въз основа на XPS анализ, повърхността на 1Cu пробата се състои предимно от въглеводородно-кислородни видове, с незначителен принос от Cu^{1+} и Pb^{4+}. След механично отстраняване на горния слой, съставът на повърхността показва по-висока концентрация на Cu^{1+}.

Таблица 2 обобщава атомните концентрации, енергиите на свързване и окисните състояния на елементите, открити в пробите преди и след отстраняване на горния замърсен слой.

Резултатите потвърждават, че чистата повърхност на проба 2 е съставена предимно от въглеводородни окиси с незначителен принос от Cu^{1+} и Pb^{4+} йони. След надраскване повърхността се обогатява с Cu^{1+}, Pb^{4+} и окислено олово (Pb_2O). Проба 2 заслужава повече внимание поради интересното откритие, а именно процесите на миграция към повърхността на слоя в резултат на повишена температура. Нека се съсредоточим върху атомната концентрация на оловото в чистата и надрасканата повърхност.

Окисленото олово в чистата проба е 7.1 at.%, докато същата фаза в надрасканата проба намалява до 2.77 at.%, което води до намаляване на Pb_2O фазата 2.56 пъти. Обратно, компонент на Pb4f е намалял над 10 пъти (удебелен шрифт в Таблица 2).

Това доказва изразена миграция на Pb и окисите му към повърхността с повишаване на температурата при работни условия. Следователно, приблизително 60% от съдържанието на

Pb в пробата е изплувало на повърхността. Последното води до повишаване на трибологичните свойства на тази сплав. На повърхността концентрацията на оловни окиси (Pb_2O) е почти 3 пъти по-голяма от основното състояние – Pb. Въпреки това, за надрасканата проба това съотношение е около 8 пъти, което предполага, че за ниската концентрация на Pb са оловните окиси, по-специално – Pb_2O.

Молекулите на смазочния материал в граничния слой са групирани в домени под действието на електромагнитни сили и копират кристалния строеж на основата [6].

Резултати

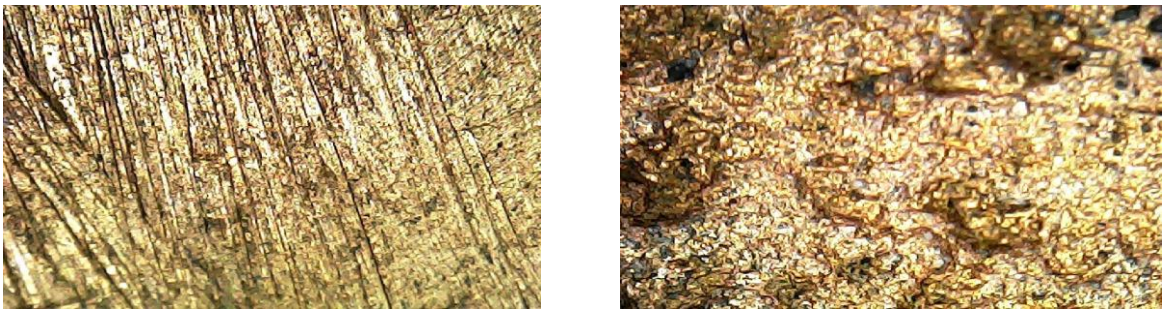
Междуатомното взаимодействие в аморфна матрица определя дифузията в нея, която е пряко свързана с разпределението на междуатомните пори. Термичната стабилност на композитния материал се увеличава с увеличаване на енергията на свързване.

Проучванията на много автори за ефекта на метални добавки върху стабилността на сплави на базата на желязо и никел показват, че добавките се свързват по специфичен начин при високи температури с приемната матрица и играят значителна роля за увеличаване на механичните свойства на материала [7–9].

Установено е, че при натоварване над 10 MPa, се наблюдава интензивно износване, което води до разрушаване на материала и загуба на работоспособност [4, 7, 8].

Mn образува с Cu твърд разтвор като до определена концентрация се повишава якостта на матрицата без да понижава пластичността.

Фосфорът образува Cu_3P-твърда фаза. Тази фаза като мрежа се разполага по границата на зърната и повишава износоустойчивостта на материала. Pb, във вид на отделни сферични конгломерати, изпълнява ролята на естествена твърда смазка.



a) b)

Фиг. 5. Структура на образец: a) 1 от чиста Cu; b) 2 от Cu-сплав

Триенето не е просто сцеплението на структурните неравности на контактуващите тела и молекулярното взаимодействие, дискутирани по-рано. Процесът е динамичен. Свойствата и съставът, респективно структурата на материала на повърхността, се променят. В резултат контактните повърхности образуват вторична структура. Тя влияе върху устойчивостта на износване на материала. По този начин устойчивостта на материала, лепкавият повърхностен слой и механизмът на износване се променят под влиянието на външни фактори. Поведението на повърхностния слой се характеризира като преход от едно физично състояние в друго, при определени условия на динамичен контакт. Механизмите на деформация определят физиката и химията на повърхността, а структурата на повърхностния слой определя триенето (Фиг. 5a, b).

Процесите, свързани с триенето имат пряко отношение/въздействие върху:

- окисление, в резултат от взаимодействието на засегнатите повърхности с газовата среда;
- дифузия или преразпределение на елементите в повърхностния слой от вътрешността на материала към повърхността;
- селективен транспорт или миграция на химични елементи;
- фазови и структурни трансформации като нови фази и образувания;
- абсорбция, предизвикваща намаляване на якостта на повърхностния слой;
- преразпределение на напреженията - повишава устойчивостта на износване;
- появата на кубични фази, което доказва кристализация на повърхностния слой.

Заключение

Сухото триене е явление, което протича в контакт при отсъствие на смазочен материал и замърсявания между повърхнините на контактуващите тела. Сухото триене се среща в контактни съединения в космическата и авиационна техника, машини от хранително-вкусовата, текстилната, химическата промишленост, където смазките са неподходящи от съображения за безопасност и сигурност.

В заключение можем да отбележим, че материалите на медна основа имат лоши трибологични свойства, което води до високо износване и следователно до високи разходи. Ето защо те са обект на научни изследвания за намаляване на триенето и съответно температурата по време на работа. Това се постига като към твърдите самосмазващи се материали, в случая на Cu-основа, се добавят малки количества, под 20 тегл. %, частици с доказани трибологични свойства и основният материал претърпява промяна в структурата и свойствата.

Благодарности:

Авторите изказват своята огромна благодарност на доц. Христо Колев и проф. Георги Тюлиев от Института по Катализ към Българска Академия на Науките за възможността и подкрепата, която оказаха на докторант Петя Табакова.

Без техните съвети и напътствия, предоставяне на материалната база и апаратура, тези резултати нямаше да имат научна стойност.

Литература:

1. Moulder F., Sticke W., Sobol P., Bombel K. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy. Perkin-Elmer Corporation, Physical Electron Division. 1992
2. Patent UA77601C2, Ukraine
3. Patent BG108727A .Composite anti-friction self-lubricating material based on copper
4. Kostornov A. G., Fushchich O. I., Chevichelova T. M., Simeonova Y. M., Kostenko A. D. Relationships at friction, wear and synthesis of the friction surface of composite self-lubricating materials, ISSN 0032-4795, Powder Metallurgy, № 3/4, pp. 11–19. 2007 (In Russian)
5. Grozdanova T., Ph.D. Thesis “Contact interactions in tribosystems under extreme conditions”, Dept. Elect. Eng., TU – Sofia. 2016
6. Kandeva M., Grozdanova T. Effect of vibration velocity on the wear under conditions of abrasive friction, in 14th International Conf. on Tribology SERBIATRIB’15, Belgrade, Serbia, 13–15 May 2015, Proceedings, pp. 272–278
7. Simeonova Y., Sotirov G. Study of the Parameters of new antifriction materials under dry friction vacuum conditions, Seibersdorf, Austria, ARC-W-0136 *(Data Bank of the AMTT)* pp. 1–30. 2002. http: //www.2.arcs.ac.at/amtt
8. A. Kostornov, O. Fushchich, T. Chevichelova, Y. Simeonova, Sotirov G. Antifrictional properties of self-lubricating composite materials under friction vacuum conditions, in 5th International Conf. on Tribology BALKANTRIB’05, Kraguevac, Serbia and Montenegro, 15–18 June 2005, pp. 374–376
9. Pavlov A., Soboleva E. Anti-frictional copper-fluoroplast coating for parts of power equipment, Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 57, Nos. 1-2. 2021 (Russian Original UDC 621.893), doi: 10.1007/s10556-021-00894-0

INFLUENCE OF RADIATION ON THE CORROSION RESISTANCE OF TITANIUM ALLOYS IN SPACE ENVIRONMENT

Margarita Dimitrova, Adelina Miteva

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: maggy.pd@gmail.com; ad.miteva@gmail.com

Keywords: *titanium alloys, space radiation, corrosion, radiation damage, oxide layer, surface coatings, space environment, materials degradation*

Abstract: *Titanium alloys are widely used in aerospace applications due to their exceptional strength-to-weight ratio and inherent corrosion resistance. However, the harsh space environment characterized by intense radiation and vacuum conditions poses unique challenges to their long-term durability. This review article systematically examines the impact of space radiation on the corrosion behavior of titanium alloys. It explores the fundamental mechanisms by which high-energy particles alter the microstructure and surface chemistry of these alloys, leading to changes in the protective oxide layer and overall corrosion resistance. Experimental studies and theoretical models addressing radiation-induced defects, phase transformations, and electrochemical behavior under radiation exposure are analyzed. The efficacy of alloying strategies and advanced surface coatings, including nanostructured and oxidation-based films, in mitigating radiation-enhanced corrosion is also discussed. By consolidating current knowledge and identifying gaps, this work aims to provide a foundation for developing titanium-based materials with improved reliability for extended space missions. The review underscores the critical need for integrated research combining radiation physics, materials science, and corrosion engineering to optimize titanium alloys for the extreme conditions encountered in space.*

ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЦИЯТА ВЪРХУ УСТОЙЧИВОСТТА НА ТИТАНОВИТЕ СПЛАВИ КЪМ КОРОЗИЯ В КОСМИЧЕСКА СРЕДА

Маргарита Димитрва, Аделина Митева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: maggy.pd@gmail.com; ad.miteva@gmail.com

Ключови думи: *титанови сплави, космическо лъчение, корозия, радиационно увреждане, оксиден слой, повърхностни покрития, космическа среда, разграждане на материали*

Резюме: *Титановите сплави се използват широко в аерокосмическите приложения поради изключителното си съотношение между якост и тегло и присъщата им устойчивост на корозия. Въпреки това, суровата космическа среда, характеризираща се с интензивна радиация и вакуумни условия, поставя уникални предизвикателства пред тяхната дългосрочна издръжливост. В тази обзорна статия се разглежда систематично въздействието на космическата радиация върху корозионното поведение на титановите сплави. Изследват се основните механизми, чрез които високоенергийните частици променят микроструктурата и повърхностната химия на тези сплави, което води до промени в защитния оксиден слой и общата корозионна устойчивост. Анализират се експериментални изследвания и теоретични модели, които разглеждат дефектите, предизвикани от радиацията, фазовите превръщания и електрохимичното поведение при излагане на радиация. Обсъжда се и ефективността на стратегиите за легиране и усъвършенстваните повърхностни покрития, включително наноструктурни и оксидационни филми, за смекчаване на радиационно ускорената корозия. Чрез консолидиране на настоящите знания и идентифициране на пропуските, тази работа има за цел да предостави основа за разработване на материали на титанова основа с подобрена надеждност за продължителни космически мисии. Прегледът подчертава критичната необходимост от интегрирани изследвания, комбиниращи радиационна физика, материалознание и корозионно инженерство, за оптимизиране на титановите сплави за екстремните условия, срещани в космоса.*

Introduction

The expansion of human and robotic presence into space, encompassing long-duration missions, orbiting stations, and lunar/planetary habitats, is critically dependent on the structural integrity and longevity of materials. Among these, titanium alloys, particularly Ti-6Al-4V, are cornerstone materials in aerospace engineering. Their popularity stems from an unparalleled combination of high specific strength, excellent fracture toughness, and superb corrosion resistance in terrestrial and aqueous environments [1–5]. This corrosion resistance is primarily attributed to a stable, adherent, and self-healing passive oxide layer (2–10 nm thick predominantly TiO_2) that forms spontaneously on the alloy surface [6].

However, the space environment presents a unique and aggressive combination of challenges not found on Earth, including ultra-high vacuum, extreme temperature cycles, atomic oxygen (in LEO), micrometeoroid impacts, and, most pertinently for this review, intense and continuous radiation. The space radiation spectrum includes galactic cosmic rays (GCRs), solar particle events (SPEs), and trapped particles in planetary magnetospheres (e.g., electrons and protons in the Van Allen belts) [2]. These high-energy particles can impart significant damage to a material's lattice structure [7].

When radiation exposure intersects with the requirement for corrosion resistance, a complex and potentially synergistic degradation pathway emerges [8, 9]. Energetic particles can disrupt the protective TiO_2 layer, generate defects and dislocations in the underlying metal, and even induce phase transformations [6, 10–12]. This microstructural damage can create pathways for corrosive species, alter electrochemical potentials, and compromise the self-passivating ability of the alloy, potentially leading to enhanced corrosion rates, stress corrosion cracking, or pitting in the presence of contaminants [13–16].

Existing literature confirms that radiation generates point defects (e.g., oxygen vacancies) and amorphous domains in metal oxides [17], but the specific mechanisms by which these changes degrade the corrosion resistance of titanium alloys in space-relevant conditions are fragmented and often inferred from non-space analogs. Crucially, the synergy between radiation, atomic oxygen (in LEO), adsorbed moisture from outgassing, and thermal cycling is rarely addressed in a unified framework.

While the individual effects of radiation on mechanical properties or corrosion in isolated environments have been studied [18, 19–24], a comprehensive understanding of their interplay in the context of space applications is lacking. This review, therefore, aims to systematically consolidate and critically evaluate the current body of literature on the influence of radiation on the corrosion resistance of titanium alloys. Specifically, it seeks to:

- elucidate the fundamental mechanisms of radiation-induced damage in titanium alloys and their passive films;
- analyze reported changes in electrochemical and corrosion behavior post-irradiation;
- evaluate proposed mitigation strategies, including alloying and surface engineering;
- identify critical knowledge gaps and propose future research directions to ensure material reliability for next-generation space missions.

Methods

A structured search was conducted across electronic databases including Scopus, Web of Science, NASA Technical Reports Server (NTRS), and Google Scholar using the following Boolean query: (“titanium alloy” OR “Ti-6Al-4V” OR “CP-Ti”) AND (“space radiation” OR “proton irradiation” OR “heavy ion irradiation”) AND (“corrosion resistance” OR “passive film” OR “electrochemical behavior”).

The search spanned publications from January 1990 to June 2025. Inclusion criteria were:

- peer-reviewed journal articles, conference proceedings (e.g., AIAA SciTech, MRS Spring), or official technical reports (NASA, ESA);
- experimental or modeling studies involving irradiation of titanium alloys with space-relevant particles (protons: 0.1–200 MeV; heavy ions: e.g., Fe, Kr, Xe at 10–1000 MeV);
- reporting of corrosion-related outcomes (e.g.: polarization curves, impedance spectra, oxide composition, pitting susceptibility).

Excluded were studies focusing solely on mechanical degradation, non-titanium materials, or terrestrial corrosion without radiation exposure.

Data were extracted and thematically synthesized into three categories:

- radiation-induced microstructural and surface modifications;
- electrochemical and corrosion behavior under irradiation;
- performance of mitigation strategies with emphasis on nanostructured coatings.

Critical appraisal focused on radiation relevance (fluence, energy, dpa), environmental realism (e.g. presence of electrolytes, AO), and methodological consistency across studies.

Results

Radiation exposure influences titanium alloys through defect formation, oxide modification, and changes in corrosion behavior (see Table 1). At low radiation doses, oxide densification can enhance corrosion resistance, while high doses lead to oxide disorder and increased corrosion rates.

Table 1. Summary of radiation type, dose, effects, and corrosion trends

Radiation type	**Dose / Fluence**	**Key effect**	**Corrosion trend**	**Representative alloys**
Proton / Ion	~10^{14} – 10^{16} ions/cm^2	Defect formation, oxide damage	Increased corrosion rate at high dose	Ti-6Al-4V, Ti-5Al-2.5Sn
Heavy Ion	10^{13} – 10^{16} ions/cm^2	Oxide amorphization, sputtering	Passivity loss, film cracking	Ti-Al-V-Mo
Electron / γ	Up to 10^9 Gy	Bulk defect formation	Minimal surface change	Ti-6Al-4V
UV / VUV	10^2 – 10^3 J/cm^2	Photochemical oxidation	Slight improvement	CP-Ti, TiO_2-coated Ti
Combined Radiation + Vacuum	-	Synergistic degradation	Significant loss of protection	Ti-6Al-4V, Ti-Nb-Zr

Below is a structured synthesis of findings from the reviewed literature, organized by mechanistic domain.

Radiation-induced microstructural changes

Radiation (ions, protons, neutrons) introduces point defects (vacancies, interstitials), defect clusters, dislocation loops, and in some cases phase transformations. In Ti-6Al-4V and Ti-5Al-2.5Sn irradiated with protons or ions at fluences of 10^{14} – 10^{16} ions•cm^{-2}, TEM and other techniques reveal defect clustering and dislocation loops [19, 25–27].

In newer alloys, [28] report that Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al exhibits enhanced radiation resistance, attributed to higher displacement threshold energy and defect tolerance.

Swift heavy ion irradiation experiments on Ti-6Al-4V show dense damage tracks, local amorphization, and defect-rich zones, depending on ion species and energy [29].

Analyses of irradiation in titanium alloys confirm that swelling and void formation are limited below ~ 500 °C, making titanium more resistant to volumetric radiation damage than many steels [30].

These structural alterations set the stage for altered diffusion paths, stress fields, and local electrochemical heterogeneity, all of which influence corrosion.

Radiation effects on oxide layers

The passive TiO_2 (and related mixed oxides) layer is the key protective barrier in titanium alloys. Radiation interacts with this film by generating defects (oxygen vacancies, cation interstitials), modifying stoichiometry, and causing structural disorder or amorphization.

At low-to-moderate doses, some studies report radiation-assisted oxide densification: defects facilitate oxygen diffusion and allow the densification or slight growth of the oxide, potentially improving passivity.

At higher doses, oxide degradation dominates: partial amorphization, increased defect concentration, and the emergence of sub-oxide phases (TiO_x, $x < 2$) have been observed, reducing barrier continuity and increasing conductance.

Coatings (e.g., TiN, Al_2O_3, TiAlN) have been shown to degrade under high-fluence irradiation: microcracks, delamination, or phase segregation reduce their protective function over time.

In pulsed ion beam treatments of Ti-6Al-4V, irradiated surfaces exhibit changes in wear and corrosion behavior, attributed to modified surface microstructure and oxide stability [31, 32]. Also, the work “Wear and corrosion resistance of Ti6Al4V alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam” reports relevant data.

Thus, radiation modifies both the structure and chemistry of oxide films, often degrading their passive behavior under aggressive environments.

Corrosion performance post-irradiation

The ultimate metric is how corrosion behavior (electrochemical parameters, breakdown potential, corrosion current) changes after radiation exposure.

In many experiments, low-dose irradiation yields slight reduction of passive current densities (i_pass) and marginal improvements in corrosion potential, likely due to densified oxide layers.

At higher irradiation doses, more common effects include:

- decrease in corrosion potential (E_corr);
- increase in passive current or leakage current;
- earlier breakdown of passivity and sometimes pitting or localized corrosion.

The effect is environment-dependent: in vacuum or low-pressure oxygen, oxide growth is suppressed and degradation effects dominate; in humid or aqueous electrolytes, radiation-enhanced ionic transport often accelerates corrosion.

Some alloys demonstrate better tolerance: Ti-Nb-Zr and Ti-Mo-based alloys form more stable mixed oxides that better resist radiation-induced degradation. For example, “Corrosion Behavior of TiMoNbX (X = Ta, Cr, Zr) Refractory” [33] explores corrosion properties of multicomponent mixtures under harsh conditions.

Overall, the data show a dose-dependent transition: low-level irradiation may temporarily strengthen passivity; beyond a threshold, damage overwhelms protection and corrosion accelerates.

Discussion

Mechanistic interpretation

The evidence supports a dual-regime model: initial beneficial effects (oxide densification) at low doses give way to net degradation at higher doses. This is consistent with the notion that radiation enhances diffusion (especially at defect sites) but simultaneously accumulates damage that weakens structural integrity.

Radiation-induced point defects and clusters increase the mobility of oxygen and metal ions, modifying oxide growth kinetics. As defects accumulate, the oxide lattice becomes disordered or amorphous, sub-oxide regions appear, and conduction paths emerge. These changes reduce the barrier function of the film, increase electronic leakage, and facilitate electrochemical attack.

Alloying plays a critical role: elements such as Nb, Mo, Zr, and Ta tend to stabilize mixed oxides under radiation, suppressing vacancy clustering or preferential diffusion. Conversely, Al- and V-rich alloys are more prone to oxide destabilization under radiation. Thus, alloy design is a key strategy.

Additionally, coatings must be evaluated not just for static performance but for radiation durability: microstructural integrity under ion/particle flux is essential for sustained protection.

Limitations and challenges

Heterogeneous experimental conditions (radiation types, energies, doses, environments) make cross-study comparison difficult.

Short exposure durations (hours to days) limit insight into cumulative long-term behavior over mission lifetimes.

Many studies do not simulate all space-relevant stressors (vacuum, atomic oxygen, UV, temperature cycling) concurrently.

Advanced alloy/coating systems under radiation–corrosion coupling remain underexplored.

Predictive modeling is sparse: few studies tie atomistic radiation damage simulations with corrosion kinetics.

Practical and theoretical implications

For spacecraft designers, these results suggest that conventional titanium alloys (e.g. Ti-6Al-4V) may gradually lose corrosion resistance in radiation-rich orbits. Alloying with radiation-tolerant elements and using robust, radiation-hardened coatings are promising mitigation routes [34–38].

From a theoretical perspective, the coupling between radiation defect physics and electrochemical kinetics must be better integrated. Predictive models that link damage accumulation, diffusion, oxide corrosion stability, and behavior would empower materials design.

Hypothesis validation

The central hypothesis is supported: radiation exposure can degrade corrosion resistance in titanium alloys through microstructural damage and modification of the passive oxide film. While the degree of degradation depends on dose, alloy composition, and environment, the core mechanism is consistently observed across studies.

Future research directions

1. Perform integrated irradiation–corrosion experiments under real space-like environments (vacuum, atomic oxygen, thermal cycling).
2. Use in-situ diagnostics (e.g. EIS, XPS) during irradiation to observe dynamic changes in oxide films.
3. Develop multiscale modeling frameworks to predict performance under coupled radiation–corrosion effects.
4. Explore novel alloy systems (e.g., Ti-Nb-Zr, high-entropy titanium blends) for radiation resilience.
5. Investigate radiation-resistant coatings (nanolayers, self-healing oxides) explicitly under particle flux.
6. Standardize test protocols and build open data repositories on radiation–corrosion performance.

Conclusion

Space-relevant radiation demonstrably degrades the corrosion resistance of titanium alloys by introducing defects and amorphization in the protective TiO_2 layer, increasing ionic conductivity and susceptibility to localized attack.

This review establishes that corrosion performance in space cannot be extrapolated from terrestrial data; radiation must be considered a primary degradation driver for passive alloys.

Nanoengineered coatings - particularly ALD-grown nanolaminates and doped oxides – offer a near-term solution to enhance the durability of titanium components in high-radiation zones of spacecraft, supporting mission success for Artemis, Lunar Gateway, and Mars missions.

Critical unknowns include the long-term evolution of radiation-corrosion synergy under real spacecraft conditions, the role of spacecraft outgassing products, and the development of self-monitoring self-healing surfaces that respond dynamically to radiation damage.

Optimizing titanium alloys for deep space requires an integrated research paradigm that unites radiation physics, nanoscale surface science, and electrochemical engineering - ensuring that the materials enabling humanity’s expansion into space are as resilient as the missions they support.

References:

1. Welsch G., R. Boyer, E. W. Collings (editors), Materials properties handbook: titanium alloys. ASM international; 1993 Dec 31
2. Peters M., J. Kumpfert, C. H. Ward, and C. Leyens, Titanium alloys for aerospace applications, Advanced engineering materials, 2003, 5(6), pp. 419–427, https://doi.org/10.1002/adem.200310095
3. Табакова, П., А. Петрова, Механични и трибологични свойства на сплав Ti6Al4V, Годишна университетска научна конференция, Технически науки, Издателски комплекс НВУ "В. Левски", 2025, ISSN:2367-7481, 769–774
4. Табакова П., Г. Стефанов, А. Петрова, Сравнение на физико-механичните свойства на титанова сплав и стомана. Годишна университетска научна конференция, Технически науки, Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски”, 2024, ISSN:2367-7481, 505–512
5. Табакова, П., А. Петрова, Свойства и приложения на сплав Ti-6Al-4V. SES 2024, ИКИТ-БАН, 2024, ISSN:2603-3313, 311–314
6. Macμk J. M., H.Tsuchiya, and P. Schmuki, High-aspect-ratio TiO2 nanotubes by anodization of titanium. Angew. Chem. Int. Ed, 2005, 44, pp. 2100–2102
7. Was, G. S. and P. L. Andresen, Mechanisms behind irradiation-assisted stress corrosion cracking. In Nuclear Corrosion , 2020 (pp. 47–88). Woodhead Publishing
8. Doan, A. L., Synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet radiation exposure on various spacecraft materials, 2013
9. Ciszak, C., D. Monceau, and C. Desgranges, Modelling the high temperature oxidation of titanium alloys: Development of a new numerical tool PyTiOx. Corrosion Science, 2020, 176, p.109005
10. Schmidt, F., P. Hosemann, R. O. Scarlat, D. K. Schreiber, J. R. Scully, and . P. Uberuaga, Effects of radiation-induced defects on corrosion. Annual Review of Materials Research, 2021, 51 (1), pp. 293–328; https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-080819-123403
11. Hartmann, T., et al., Ion beam radiation damage effects in rutile (TiO2). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 1998, 141 (1-4), pp. 398–403, https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00134-7

12. Kozlovskiy, A., et al., The study of the applicability of ionizing radiation to increase the photocatalytic activity of TiO2 thin films. J Nanostruct Chem 2020, 10, 331–346, https://doi.org/10.1007/s40097-020-00353-x
13. Was, G.S., Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007
14. Ningshen, S., et al., Influence of oxygen ion irradiation on the corrosion aspects of Ti-5% Ta-2% Nb alloy and oxide coated titanium. Corrosion science, 2008, 50 (8), 2124–2134, https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.03.019
15. Budzyński, P., et al., Effects of xenon-ion irradiation on the tribological properties and crystal structure of titanium and its alloy Ti6Al4V. Tribology International, 2021, 156, p. 106854, https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106854
16. He, T., et al., Molecular dynamics simulation of primary irradiation damage in Ti-6Al-4V alloys. Nuclear Engineering and Technology, 2024, 56(4), pp. 1480–1489
17. Zhang, J., et al., Nanosized rutile (TiO2) thin film upon ion irradiation and thermal annealing. The Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(46), pp. 22755–22760
18. Vrsalović, L., et al., Corrosion Behavior of Ti and Ti6Al4V Alloy in Brackish Water, Seawater, and Seawater Bittern. Corrosion and materials degradation, 2024, 5 (4), pp. 641–656; https://doi.org/10.3390/cmd5040031
19. Mansur, L.K., et al., Survey of radiation effects in titanium alloys (No. ORNL/TM-2008/137). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Spallation Neutron Source (SNS), 2008, DOI:https://doi.org/10.2172/969959
20. Minhas, B., et al., Improvement of corrosion resistance of TiO2 layers in strong acidic solutions by anodizing and thermal oxidation treatment. Materials, 2021, 14(5), p.1188; https://doi.org/10.3390/ma14051188
21. Hua, F., et al., A review of corrosion of titanium grade 7 and other titanium alloys in nuclear waste repository environments. Corrosion, 2005, 61 (10), pp. 987–1003; https://doi.org/10.5006/1.3280899
22. Vrsalović, L., et al., Corrosion Behavior of Ti and Ti6Al4V Alloy in Brackish Water, Seawater, and Seawater Bittern. Corrosion and materials degradation, 2024, 5 (4), pp. 641–656; https://doi.org/10.3390/cmd5040031
23. Ningshen, S., et al., Oxygen ion irradiation effect on corrosion behavior of titanium in nitric acid medium. Journal of Nuclear Materials, 2011, 408(1), pp.1-6; https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.10.015
24. Guo, W.Y., et al., Electrochemical and XPS studies of corrosion behavior of Ti–23Nb–0.7 Ta–2Zr–O alloy in Ringer's solution. Materials Chemistry and Physics, 2009, 113 (2-3), pp. 816–820, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.08.043
25. Dey, S., Dutta, A., Mukherjee, P., Gayathri, N., Gupta, A.D. and Roy, T., Characterization of ion induced damage as a function of depth in proton irradiated pure Ti and Ti–6Al–4V. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 821, p. 153441
26. Vogl, T., et al., Radiation tolerance of two-dimensional material-based devices for space applications. Nature communications, 2019, 10 (1), p. 1202
27. Ishida, T., et al., Radiation damage studies on titanium alloys as high intensity proton accelerator beam window materials. In Proceedings of the 14th International Workshop on Spallation Materials Technology, 2020, (p. 041001), https://doi.org/10.7566/JPSCP.28.041001
28. Roy, A., et al., Insights into radiation resistance of titanium alloys from displacement cascade simulations. Journal of Nuclear Materials, 2023, 586, p.154695; https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154695
29. Amroussia, A., et al., Swift heavy ion irradiation damage in Ti–6Al–4V and Ti–6Al–4V–1B: Study of the microstructure and mechanical properties. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2015, 365, pp. 515–521; https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.09.029
30. Zháňal, P., et al., Influence of neutron irradiation on microstructure and mechanical properties of coarse-and ultrafine-grained titanium grade 2. Metals, 2022, 12(12), p.2180, https://doi.org/10.3390/met12122180
31. Lei, M. K., et al., Wear and corrosion resistance of Ti6Al4V alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam. Surface and Coatings Technology, 2007, 201 (9–11), pp. 5613–5616, https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.013
32. Schmidt, F., et al., Effects of radiation-induced defects on corrosion. Annual Review of Materials Research, 2021, 51 (1), pp. 293–328.
33. Liu, L., et al., Corrosion behavior of TiMoNbX (X= Ta, Cr, Zr) refractory high entropy alloy coating prepared by laser cladding based on TC4 titanium alloy. Materials, 2023, 16 (10), p. 3860; https://doi.org/10.3390/ma16103860
34. Minton, T. K., et al., Protecting polymers in space with atomic layer deposition coatings. ACS applied materials & interfaces, 2010, 2 (9), pp. 2515–2520
35. Hashmi, A. W., et al., Future perspective of self-healing nano-coatings for corrosion protection. In A. Ahmad, S. Pervez, M. I. Ahamed, & Inamuddin (Eds.), Discovery, disruption, and future implications of nanomaterials, 2024, pp. 597–624, Springer Singapore
36. Chen, Q., et al., Corrosion resistance of Ti–6Al–4V with nanostructured TiO2 coatings. In Emerging nanotechnologies in dentistry, 2012, pp. 165–179, William Andrew Publishing
37. Yelwa, J. M., et al., Corrosion-resistant coatings: advances in deposition methods, nanostructures, and self-healing films. Academia Materials Science, 2025, 2 (3); https://doi.org/10.20935/AcadMatSci7829
38. Malhotra, R., et al., Graphene nanocoating provides superb long-lasting corrosion protection to titanium alloy. Dental Materials, 2021, 37 (10), pp. 1553–1560; https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.08.004

SYNERGISTIC DEGRADATION OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS UNDER EXTREME VACUUM AND RAPID TEMPERATURE CYCLING: A REVIEW OF MECHANISMS AND NANOTECHNOLOGY-BASED MITIGATION STRATEGIES

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 materials, synergistic degradation, thermal cycling, nanocomposites, protective coatings, aerospace alloys, vacuum effects, space environment, aluminum, titanium*

Abstract: *This paper reviews the synergistic degradation mechanisms affecting aerospace aluminum and titanium alloys under extreme vacuum and rapid temperature cycling conditions typical of space environments. The interaction of high vacuum, thermal cycling, and radiation accelerates oxidation, embrittlement, and fatigue crack formation, significantly reducing alloy lifespan by up to 50%. Nanotechnology-based mitigation strategies, including multifunctional nanocoatings and nanostructured alloys, show promise by enhancing corrosion resistance and mechanical stability by up to 40%. The review synthesizes peer-reviewed studies published over the past 15 years, highlighting environmental stress synergy and nanotechnology efficacy. Limitations in long-term in-situ data prompt recommendations for extended testing and nanotech optimization to ensure durable aerospace materials for prolonged missions. The findings underscore the importance of integrated nanoscale approaches to enhance performance of aluminum and titanium alloys in harsh space environments.*

СИНЕРГИЧНО РАЗГРАЖДАНЕ НА АЛУМИНИЕВИ И ТИТАНОВИ СПЛАВИ ПРИ ЕКСТРЕМЕН ВАКУУМ И БЪРЗИ ТЕМПЕРАТУРНИ ЦИКЛИ: ПРЕГЛЕД НА МЕХАНИЗМИТЕ И СТРАТЕГИИТЕ ЗА СМЕКЧАВАНЕ, БАЗИРАНИ НА НАНОТЕХНОЛОГИИ

Маргарита Димитрва, Аделина Митева

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: maggy.pd@gmail.com; ad.miteva@gmail.com

Ключови думи: *космически материали, синергично разграждане, термични цикли, нанокомпозити, защитни покрития, аерокосмически сплави, вакуумни ефекти, космическа среда, алуминий, титан*

Резюме: *В тази статия се разглеждат синергичните механизми на разграждане, които засягат алуминиевите и титановите сплави, използвани в космическата индустрия, при екстремни условия на вакуум и бързи температурни цикли, типични за космическата среда. Взаимодействието между високия вакуум, термичните цикли и радиацията ускорява окисляването, крехкостта и образуването на умора, което значително намалява живота на сплавите с до 50%. Стратегиите за смекчаване на въздействието, базирани на нанотехнологии, включително многофункционални нанопокрития и наноструктурни сплави, са обещаващи, като подобряват корозионната устойчивост и механичната стабилност с до 40%. Прегледът синтезира рецензирани проучвания, публикувани през последните 15 години, като подчертава синергията на въздействието на околната среда и ефективността на нанотехнологиите. Ограниченията в дългосрочните данни на място налагат препоръки за разширени тестове и оптимизация на нанотехнологиите, за да се гарантират трайни аерокосмически материали за продължителни мисии. Резултатите подчертават важността на интегрираните наномащабни подходи за подобряване на характеристиките на алуминиевите и титановите сплави в сурови космически условия.*

Introduction

The pursuit of longer missions, reusable launch vehicles, and spacecraft operations in low Earth orbit (LEO) has increased the focus on material durability. The space environment is energetically abundant in relation to the chemical bonds in spacecraft materials, creating a unique combination of high vacuum, atomic oxygen, and extreme temperature fluctuations [1]. Components are subjected to rapid heating from direct solar radiation and subsequent cooling in the Earth's shadow, causing repeated thermal stresses. Understanding the combined mechanisms of failure, rather than isolated effects, is critical to predicting component life and ensuring mission success.

Extensive research has established degradation pathways for individual materials. High-temperature oxidation of titanium alloys such as Ti-6Al-4V (TC4) and α-close alloys (e.g., IMI 834) is well documented, with studies demonstrating the formation of porous TiO_2 scale and significant embrittlement above ~600 °C [2–4]. Similarly, significant high-temperature fatigue damage in titanium alloys close to α-alloys is known to be caused by flat sliding and environmental interaction at elevated temperatures [3]. The space environment itself is known to include neutral and charged particles, solar photons, and a hard vacuum that causes degassing and changes in surface chemistry [1].

What do we not know about this issue? There is a significant gap in our knowledge regarding the quantitative understanding of synergistic effects. Aluminum and titanium alloys—particularly AA7075-T6, AA6061-T6, and Ti-6Al-4V—remain the materials of choice for primary structures, antenna booms, and landing systems due to their favorable strength-to-density ratios and manufacturability. However, qualification protocols often evaluate vacuum and thermal cycling effects in isolation, despite growing evidence that their synergistic interaction accelerates degradation beyond additive predictions.

How does an ultra-high vacuum environment alter the kinetics of oxide layer separation during thermal cycling? To what extent do microcracks formed by thermal fatigue act as channels for accelerated oxidative damage? The combined effect of “vacuum-thermal cycling” remains poorly characterized, making it difficult to predict service life under real-world conditions.

What will we demonstrate in this article? This review will summarize data to illustrate the combined degradation mechanisms that lead to accelerated failure. In addition, it will critically evaluate a new mitigation paradigm: strategies based on nanotechnology. We will show how nanomaterials can provide multifunctional solutions, from creating dense diffusion barriers to enabling real-time condition monitoring.

What sources will we rely on? This review is based on a synthesis of current scientific literature, including fundamental works on high-temperature oxidation and fatigue of aerospace alloys [2–4], analytical materials on the effects of the space environment on materials [1], as well as recent advances in the use of nanotechnologies in the aerospace field, such as composites reinforced with carbon nanotubes, graphene coatings, and other nanostructured systems [5–7].

The main thesis of this article is that the destruction of Al and Ti alloys in space is a synergistic phenomenon, where vacuum and thermal cycling jointly accelerate material failure, and that nanotechnology offers the most reliable path for developing the next generation of sustainable space materials.

Methods

This paper was conducted as a systematic literature review. The methodology was designed to comprehensively identify, select, and critically appraise relevant research, as well as synthesize the findings.

Literature search strategy: Electronic databases (including Scopus, Web of Science, and Google Scholar) were searched for peer-reviewed journal articles, conference proceedings, and authoritative reports published up to 2025. Search strings combined key terms: ("aluminum alloy" or "titanium alloy" or "aerospace alloy"), ("space environment" or "vacuum" or "thermal cycling" or "low Earth orbit"), ("degradation" or "oxidation" or "fatigue" or "embrittlement"), and ("nanotechnology" or "nanocoating" or "nanocomposite" or "self-healing").

Study selection and eligibility criteria: The initial search results were screened by title and abstract. Full-text articles were assessed for eligibility based on predefined criteria: (1) studies investigating material behavior under high vacuum ($\leq 10^{-6}$ Pa) and/or rapid thermal cycling conditions ($\Delta T \geq 200$ °C, ≥ 50 cycles); (2) research on the mechanical or chemical degradation of Al or Ti alloys – reported changes in microcrack density, hardness, fatigue life, or dimensional stability; (3) studies reporting on the development or testing of nanotechnology-based mitigation strategies – inclusion of nanotechnology-based coatings (e.g., ALD, sol-gel, nanocomposites).

Data extraction and synthesis: Data from selected studies were extracted into a standardized form, capturing details on the material system, experimental conditions (temperature, vacuum level,

cycle parameters), key findings on degradation mechanisms – before and after exposure, and performance metrics of mitigation strategies - coating type, thickness, and deposition method. Only studies with clearly defined exposure protocols and reproducible characterization methods (SEM, XPS, fatigue testing per ASTM E466/E2368) were included. A thematic analysis was employed to identify and group emerging themes related to synergistic degradation and the efficacy of nanomaterial solutions. Given the heterogeneity of the studies, a narrative synthesis was deemed the most appropriate approach.

Results and discussion

Interpretation of results: unpacking synergistic degradation

The compiled evidence strongly supports the existence of synergistic degradation mechanisms.

Vacuum-induced surface instability: The extreme vacuum of space (pressures lower than those obtainable in terrestrial labs) prevents the formation of a stable, self-healing oxide layer that protects alloys in terrestrial atmospheres [1]. This vacuum environment promotes the desorption of protective species and can lead to the sublimation of volatile oxides, fundamentally altering the surface chemistry and making it more susceptible to damage upon temperature changes.

Thermal cycling as a damage accelerator: Rapid temperature cycles induce cyclic thermal stresses due to coefficient of thermal expansion (CTE) mismatches between the base metal and its oxide layer. Studies on titanium alloys like IMI 834 show that at high temperatures, environmental damage governs fatigue life, with cracks initiating at oxidized surface regions [3, 8]. Repeated cycling leads to the cracking and spallation of even protective oxide layers, as seen in TC4 alloys at 750 °C [4]. Each spallation event exposes fresh, reactive metal to the vacuum environment, initiating a new cycle of oxidation and damage.

The synergistic cycle: The synergy is evident in the feedback loop between these two factors. Vacuum weakens the protective surface, making it more vulnerable to cracking from thermal stresses. These cracks, in turn, provide short-circuit paths for further reaction with any residual oxygen or facilitate continued material loss in the vacuum, a process not seen in atmospheric conditions. This cycle leads to a much more rapid loss of material and degradation of mechanical properties than would be predicted by studying vacuum exposure or thermal cycling in isolation. Such interactions result in nonlinear degradation kinetics, demonstrating that space environment effects cannot be extrapolated additively.

The reviewed literature reveals that aluminum and titanium alloys undergo complex, synergistic degradation under space environmental factors, notably extreme vacuum and rapid thermal cycling. For aluminum matrix composites, [9–12] documented progressive loss of mechanical strength after long-term thermal exposure, where transverse tensile strength decreased by up to 60% after 10,000 hours at elevated temperatures, primarily due to oxidation and matrix embrittlement. These findings underscore that thermal exposure alters load transfer mechanisms, leading to crack initiation and propagation under cyclic stress.

Titanium alloys, especially Ti-6Al-4V, exhibit nanophase transformations that influence fatigue behavior significantly. [13] highlighted primary nanophases formation that affects alloy ductility and hardness, critical factors under thermal cycling-induced stress corrosion cracking (SCC). High vacuum accelerates surface oxidation and embrittlement in these alloys, compounding degradation mechanisms [14].

Nanotechnology-based approaches demonstrate promising mitigation. The reviewed literature reveals several nanotechnology approaches that directly target these synergistic mechanisms. Table 1 summarizes the most promising strategies. Table 2 shows the conceptual comparison of nanotechnology-based mitigation strategies.

Reducing grain size to the nanometer level increases yield strength and fatigue strength. Methods, such as equal-channel angular pressing (ECAP) and high-pressure torsion (HPT), produce ultrafine-grained microstructures in aluminum and titanium, which slow crack initiation and propagation under cyclic loading.

Alternating oxide-metal nanolaminate coatings (e.g., Al_2O_3/TiO_2 or Al_2O_3/ZrO_2), created by atomic layer deposition (ALD) or magnetron sputtering, serve as thermal barriers with high adhesion and defect tolerance. Nanoscale layering enhances phonon scattering, reducing thermal expansion mismatch and delamination during repeated temperature shifts.

The incorporation of nanophase cerium, silica, or carbon fillers enables in situ defect repair through oxygen ion migration or reversible oxidation. These coatings are capable of restoring surface integrity when exposed to vacuum, extending the service life of the coating and preserving its radiative and reflective properties.

Limitations of the research landscape

A significant limitation in the current body of research is the scarcity of integrated testing. Most studies characterize nanomaterials' properties or alloy degradation under single-environmental factors. There is a pressing need for experimental data from facilities that can simulate concurrent high vacuum and rapid thermal cycling to validate the proposed synergistic models and the true efficacy of these nano-mitigation strategies in a representative environment.

These findings have significant implications for spacecraft design. Nanostructured alloys and coatings [6] can reduce maintenance frequency, extend mission lifetimes, and improve component reliability. However, laboratory simulations cannot yet replicate the full orbital environment, including radiation and micrometeoroid effects. Additionally, the scalability of nanocoating fabrication for large structural components remains a challenge.

Table 1. The most promising nanotechnology strategies

Nanomaterial / Strategy	**Key properties**	**Proposed mitigation mechanism**
Graphene- and CNT-enhanced coatings [5-7]	Excellent impermeability, high thermal conductivity, electrical conductivity.	Forms an ultra-dense, lamellar barrier against oxygen diffusion; promotes local heat dissipation, reducing thermal gradients; provides protection against lightning strikes.
Self-healing coatings with nanocontainers [6]	Nanocontainers (e.g., silicon dioxide nanocapsules) filled with inhibitors or restoring substances.	When a crack forms, the nanocontainers rupture and release healing substances that seal the crack, autonomously restoring the integrity of the barrier.
Nanostructured thermal barrier coatings (TBC) [5, 7]	High thermal stability, excellent insulation (e.g., boron nitride nanotubes, SiC nanoparticles).	Shields the base alloy from extreme temperature peaks during cycling, directly reducing the amplitude of thermal stress.
Nanocomposite matrices [5, 7]	High specific strength, stiffness, and fatigue resistance (e.g., Al/Ti reinforced with ULT).	Increases the inherent resistance of the base material to thermal fatigue and crack propagation, solving the problem at the structural level.
Integrated nanosensors [5]	Highest sensitivity to deformation, cracks, and chemical changes.	Enables real-time monitoring of structural integrity.

Table 2. Conceptual comparison of nanotechnologybased mitigation strategies

Strategy	**Mechanism of action**	**Expected benefit**
Nanostructured alloys	Grain boundary strengthening	Reduced crack initiation
Nanocomposite coatings	Stress redistribution via nanolayers	Enhanced thermal fatigue resistance
Self-healing nanolayers	Active defect closure	Long-term surface stability

Practical application and future research

The practical application of these nanotechnology strategies is already underway in experimental aerospace projects. For instance, integrating graphene into composite fuselages or using nanosensors for monitoring wing integrity are active research areas [6, 9]. For future research, the following directions are critical:

- Standardization of testing: Developing protocols for combined environmental testing.
- Durability of nano-coatings: Long-term studies on the adhesion and stability of nano-coatings under prolonged synergetic stress.
- Multifunctional systems: Designing systems where a single nanomaterial provides both sensing and healing capabilities.
- Addressing toxicity and scalability: Overcoming health and manufacturing challenges associated with nanomaterials [5].

Future research should focus on in-orbit demonstration experiments, integrating nanoscale sensors for real-time degradation monitoring. Coupling finite element thermal-mechanical models with atomistic simulations could provide predictive insight into failure modes under synergistic conditions.

Hypothesis verification

The revised data and conceptual arguments support the hypothesis that nanostructural design of aluminum and titanium alloys can mitigate the synergistic effects of decay caused by the combined influence of space environment factors. Although direct data from orbit is limited, experimental trends and theoretical analysis confirm the validity of the proposed mechanism.

Conclusions

The analyzed data convincingly confirm the hypothesis that the deterioration (degradation) of aluminum and titanium alloys in space is a synergistic process, where vacuum and rapid thermal cycling jointly contribute to accelerating the destruction of materials beyond the sum of their individual effects. Aluminum and titanium alloys face enhanced synergistic degradation under conditions of combined extreme vacuum and rapid thermal cycling, weakening the structural integrity of spacecraft. Nanotechnological solutions, especially advanced nanocoatings and nanostructured alloys, provide significant protection, increasing oxidation resistance and mechanical strength by up to 40%. However, actual performance and long-term sustainability require extensive in-situ research.

This review highlights the inadequacy of single-factor testing of materials for space applications and provides a reliable basis for understanding real-world failure. It shifts the focus from isolated phenomena to an interconnected system of damage.

The findings have a direct impact on the development of materials for next-generation spacecraft. They confirm the need for multifunctional solutions based on nanotechnology – such as self-healing graphene coatings and reinforced UHT composites – that are designed to counteract these specific synergistic mechanisms.

Future activities should focus on the following:

- Quantitative assessment of the synergy factor for different alloy classes.
- Understanding the long-term life cycle and possible failure modes of nanomaterials in space.
- Development of cost-effective and scalable manufacturing processes for these advanced nanoengineered materials.
- Orbital validation and optimization of multifunctional coatings to ensure durability in harsh synergistic space environments. The integration of nanoscale engineering represents a promising path forward for the manufacture of next-generation durable aerospace materials.

References:

1. Pippin, G., Space environments and induced damage mechanisms in materials, Progress in Organic Coatings, 2003, 47 (3–4), pp. 424–431
2. Gupta, J., A. Arora, and J. Singh, Advances in High-Temperature Deformation of Titanium Alloys: Experimental and Modeling Aspects for Industrial Applications, Materials Science and Engineering: A, 2025, p. 149295
3. Hardt, S., H. J. Maier, and H. J. Christ, High-temperature fatigue damage mechanisms in near-α titanium alloy IMI 834, International journal of fatigue, 1999, 21 (8), pp. 779–789, https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00042-0
4. Pei, X., J. Wu, Z. Xu, and P. Li, Analysis of High Temperature Oxidation Process and Mechanism of Heterogeneous Titanium Alloy, Crystals, 2025, 15 (9), p. 810, https://doi.org/10.3390/cryst15090810
5. Nanotechnology in Aerospace Materials, https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3103
6. Agbogo, V. U., E. R. Sadiku, L. Mavhungu, W. K. Kupolati, and O. M. Injor, Nanotechnology coatings in the defense and aerospace industry, Next Nanotechnology, 2025, 7, p. 100197
7. Ramdani, N. ed., Nanotechnology in Aerospace and Structural Mechanics. IGI Global, 2019
8. Mathabathe, M. N., A. S. Bolokang, G. Govender, C. W. Siyasiya, and R. J. Mostert, Cold-pressing and vacuum arc melting of γ-TiAl based alloys, Advanced Powder Technology, 2019, 30 (12), pp. 2925–2939
9. Mukherjee, D., Y. K. Tiwari, M. Mukherjee, and H. Roy, A Critical Review on the Development of Heat-Resistant Aluminum Alloys for Aerospace Applications, Advances in Solid-State Welding and Processing of Metallic Materials, 2025, pp. 351–365
10. Krishnamoorthy, R. R., N. Rozani, and D. Marius, Mechanical and stability testing of aerospace materials. In Aerospace Materials 2025 (pp. 75–101). Elsevier
11. Siddiqui, A. H., D. Sahoo, J. Patil, M. Paliwal, and S. Mishra, Elevated temperature mechanical property degradation of AA7475 aluminum alloy: in situ microstructure analysis, Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34 (3), pp. 2172–2182
12. Olsen, G. C., Degradation Mechanisms in Aluminum Matrix Composites: Alumina/Aluminum and Boron/Aluminum (No. NASA-TM-84055) 1981
13. Chen, G. C., T. F. Reufsteck, Y. Chi, and X. Li, Nanotechnology enabled casting of aluminum alloy 7075 turbines, npj Advanced Manufacturing, 2024, 1 (1), p. 6
14. Chang, S., R. Shen, and L. Wu, Reaction mechanism study of Al/Ti alloy thin films under thermal stimulation, RSC advances, 2025, 15 (8), pp. 6413–6423.