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

Огнян Огнянов, Десислава Тенева, Пенка Мъглова, Алексей Стоев

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

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

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

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

Ognyan Ognyanov, Desislava Teneva, Penka Maglova, Alexey Stoev

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

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

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

Въведение

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

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

- откриване и каталогизиране на изкуствени и природни обекти;
- определяне и прогнозиране на техните орбитални параметри;
- оценка на рисковете от сблъсъци и потенциалните щети;
- разработване и прилагане на методи за защита срещу идентифицирани заплахи.

Към началото на 2026 г. броят на каталогизираните обекти от космически отломки с размер над 10 см надхвърли 40 000, докато броят на проследените потенциално опасни астероиди достигна 2998. Наблюдава се постоянна възходяща тенденция, обусловена както от подобреното оборудване за наблюдение, така и от продължаващото замърсяване на околоземното пространство, причинено от човека [3].

Тази статия представя аналитичен преглед, систематизиращ най-новите постижения в геопространствения мониторинг и защитата от космически опасности. Целта на прегледа е да се подчертаят ключови технологични тенденции, да се оцени техният потенциал и да се идентифицират бариерите пред внедряването им. Материалът се основава на анализ на научни публикации, данни от международни проекти (като ISON и MASTER) и публични доклади от космически агенции.

Съвременно състояние на околоземното космическо пространство

Космическите отпадъци включват нефункциониращи изкуствени спътници, отработени степени на ракети-носители, фрагменти в резултат на сблъсъци и експлозии и технологични елементи, загубени по време на космически дейности. Разпределението на тези обекти по орбита и размер представя сложна картина, която оказва значително влияние върху дългосрочната устойчивост на космическите дейности [4].

Динамиката на растеж на броя на каталогизираните обекти от космически отпадъци през последните години отразява както нарастващата активност в космоса, така и подобрените възможности за наблюдение [5].

Особено безпокойство представлява нарастващият брой фрагменти в резултат на сблъсъци и умишленото унищожаване на спътници по време на тестове на противосателитни оръжия [6].

Астероиди с минимално разстояние за пресичане със Земята (MOID) по-малко от 0,05 AU (~7,5 милиона km) и абсолютна величина H < 22 (съответстваща на диаметър по-голям от 140 m) се считат за потенциално опасни. Сблъсък с такъв обект може да доведе до регионална или глобална катастрофа.

А. Системи за наблюдение на близкоземното пространство

Ядрото на глобалната система за наблюдение на близкоземното пространство са наземните наблюдателни съоръжения, включително оптични телескопи и радарни станции [7].

Космическите системи за наблюдение предлагат няколко предимства пред наземните съоръжения, включително липсата на атмосферни изкривявания, възможността за непрекъснато наблюдение и по-благоприятно геометрично положение спрямо наблюдаваните обекти [8].

Ефективното наблюдение на близкоземното пространство изисква интегрирането на различни наблюдателни системи и обмена на данни между тях. В момента съществуват няколко международни инициативи за координиране на усилията в тази област.

Б. Международни инициативи за координация на мониторинга

Ефективното наблюдение на близкоземното пространство изисква глобално сътрудничество. Ключови активни инициативи включват:

Проект ISON (Международна научна оптична мрежа)

Най-голямата международна мрежа от оптични обсерватории, обединяваща 23 обсерватории в Европа, Азия, Африка и Северна и Южна Америка. Основни цели:

- Проследяване на над 10 000 обекта (GEO, HEO, LEO), включително космически отломки и астероиди.
- Автоматизирано управление на телескопи чрез софтуер (напр. FORTE) и обработка на данни с помощта на изкуствен интелект.

Мрежа от обсерватории на БРИКС

Разработена от 2019 г. като част от сътрудничеството на БРИКС.

Пример: Руско-китайски наблюдения на фрагменти от стадий на Кентавър са първата стъпка към създаването на единна мрежа [14].

Цели: Съвместни кампании за проследяване на отломки и опасни астероиди, стандартизация на данните.

Програма на ESA

Програма на Службата за космически отломки на ESA: координация на радарни и телескопни данни, включително сътрудничество с ISON.

Методи за защита от космически отломки и астероидни опасности

Пасивните методи за защита са насочени към минимизиране на вероятността от образуване на нови космически отломки и намаляване на риска от сблъсъци със съществуващи обекти.

Активните методи за защита включват системи за избягване на сблъсъци и технологии за активно отстраняване на отломки.

Ефективността на маневрите за избягване зависи от точността на определяне на орбитата, навременността на откриване на заплахата и маневреността на космическия кораб [9].

Основната стратегия за защита от астероидни опасности е ранното откриване на потенциално опасни обекти и определянето на техните орбитални и физически характеристики.

За да се предотврати сблъсък на потенциално опасен астероид със Земята, неговата траектория трябва да бъде променена, за да се осигури безопасно прелитане [10].

Информационни технологии в системите за защита от космически отломки и астероидни опасности

Съвременните системи за геопространствен мониторинг и защита от заплахи са невъзможни без използването на съвременни информационни технологии (ИТ). Те позволяват събирането, обработката, анализа и разпространението на данни, както и автоматизираното управление на системите за наблюдение.

А. Софтуер за управление на мрежата от телескопи

Специализираните софтуерни системи, които координират работата на разпределените обсерватории, играят ключова роля. Сред най-успешните примери:

Проектът ISON

Използва автоматизирана система за управление на роботизирани оптични обсерватории, която включва:

- планиране на наблюденията, като се вземат предвид метеорологичните условия и приоритетите на задачите;
- обработка на изображения в реално време с помощта на алгоритми за машинно обучение за идентифициране на обекти;
- интеграция с бази данни за орбитални параметри за бързи актуализации на каталога [15].

MASTER Global Network

Базиран на концепцията за многофункционален астрономически комплекс с динамично интегрирана база данни. Софтуерът му осигурява:

- многоканални наблюдения (оптични, UV, радио);
- автоматично разпознаване на преходни събития (включително потенциално опасни астероиди);
- координация на телескопи в различни часови зони за непрекъснато наблюдение [16].

Преходните събития в мониторинга на околоземното пространство се определят като краткосрочни или променящи се явления, като например:

- проблясъци по повърхността на обекти (напр. отражение на слънчевата светлина от въртящ се астероид);
- внезапна поява на нови обекти (отломки от сблъсък, некаталогизирани преди това астероиди);
- аномални промени в траекторията (резки маневри на спътници, гравитационни смущения).

Б. Изкуствен интелект и големи данни в мониторинга

Алгоритмите за машинно обучение [17] се използват за:

- Класифициране на обекти (отломки/астероид/сателит) въз основа на спектрални и орбитални характеристики.
- Прогнозиране на сблъсъци, като се вземат предвид орбиталните неопределености (методи на Монте Карло, модели на невронни мрежи).

Обработка на големи данни [18]:

- Агрегиране на информация от радари, лидари и телескопи в унифицирани облачни платформи (напр. Службата за космически отломки на ESA).
- Използване на графични бази данни за анализ на връзките между обекти и фрагменти след сблъсъци.

В. Моделиране и цифрови близнаци

Физически симулатори (напр. ADAM на НАСА) възпроизвеждат:

- Динамиката на облаците от отломки след фрагментация.
- Ефективността на методите за отстраняване (лазерна аблация, системи за свързване).
- Цифровите близнаци на астероидите помагат за тестване на стратегии за отклонение, като се вземат предвид съставът и структурата на обекта.

Модерни технологии

Разработването на технологии за наблюдение на околоземното пространство е фокусирано предимно върху повишаване на чувствителността на сензорите, разширяване на зоната за наблюдение и автоматизиране на откриването и проследяването на обекти [11].

Някои методи изискват уточняване на терминологията:

Аблация (от латинското ablatio, което означава „отстраняване“) е процесът на отстраняване на материя от повърхността на обект под въздействието на външни фактори (лазерно лъчение, атмосферно триене и др.). В контекста на космическите отломки и намаляването на астероидната опасност, тя се използва за промяна на орбитата на обект поради импулса, генериран от изпаряването на неговия материал. Ударник (от английската дума „impact“) е устройство, предназначено да се сблъска с обект (например астероид), за да прехвърли кинетична енергия и да промени траекторията му.

Заключение

Този преглед показва, че геокосмическият мониторинг на околоземното пространство и разработването на методи за защита от космически отломки и астероидни опасности представляват сложно научно и техническо предизвикателство, чието решение изисква интердисциплинарен подход и международно сътрудничество. Развитието на информационните технологии – от автоматизирани системи за управление на телескопи (ISON, MASTER) до анализи на големи данни, базирани на изкуствен интелект – се превръща в критичен фактор за подобряване на точността и скоростта на реагиране на космически заплахи. По-нататъшната интеграция на информационните технологии с хардуерни системи, включително квантови изчисления за ускоряване на орбиталните изчисления, ще определи конкурентоспособността на отбранителните системи през следващото десетилетие.

Анализът, проведен в тази статия, показва, че:

- Сегашното състояние на околоземното пространство се характеризира с постоянен растеж на популацията на космически отломки, което представлява нарастващи рискове за оперативните космически кораби. В същото време се увеличава скоростта на изстрелване на нови спътници, особено като част от големи съзвездия.
- Системите за мониторинг на космически отломки и астероидни опасности се развиват активно, но все още имат ограничения при откриването и каталогизирането на малки обекти. Пълнотата на каталогизирането на космически отломки с размери по-малки от 10 см в ниска орбита и по-малки от 1 м в геостационарна орбита остава недостатъчна.
- Приблизително 56% от потенциално опасните астероиди с размер над 140 м са открити, което оставя значителна несигурност при оценката на заплахата от астероиди. За обекти с размер под 100 м пълнотата на откриване е по-малка от 30%.
- Технологиите за активно смекчаване на опасността от астероиди са в етап на демонстрационна мисия и все още не са приложени в индустриален мащаб. Най-обещаващите технологии са контактното улавяне за големи обекти и безконтактните методи за множество удари върху малки фрагменти.
- Методите за смекчаване на опасността от астероиди са претърпели първата си успешна демонстрация, но изискват по-нататъшно развитие, за да се гарантира ефективност при различни сценарии на заплаха. Комбинираните подходи, включително кинетични, гравитационни и експлозивни удари, изглеждат най-обещаващи.
- Международното сътрудничество в областта на мониторинга и смекчаването на космическите заплахи се разширява, но остават значителни политически и организационни бариери. Международната правна рамка и механизмите за координация трябва да бъдат подобрени.
- Усъвършенстваните технологии за мониторинг и отбрана могат значително да подобрят ефективността на противодействието на космическите заплахи, но изискват значителни инвестиции и международно сътрудничество за своевременно разработване и внедряване.

Литература:

1. Мануйлов С. А. Космический мусор - угроза безопасности космических полетов / С. А. Мануйлов // Проблемы безопасности полетов. – 2021. – № 9. – С. 35–53.
2. Молотов И. Е. Проблемы оптического мониторинга космического мусора /, В. М. Агапов, А. И. Стрельцов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2020. – № 7. – С. 1–17.
3. Ипатов А. В. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства / А. В. Ипатов, Л. А. Ведешин, С. А. Герасютин // Земля и Вселенная. – 2024. – № 2(356). – С. 91–108.
4. Ваганов А. Г. Защита от астероидной опасности: возможные варианты / А. Г. Ваганов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 8. – С. 75–80.
5. Усовик И. В. Разработка системы мониторинга некаталогизируемого космичесого мусора / И. В. Усовик, А. А. Морозов // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 4. – С. 202–209.
6. Тесленко Е. С. Космический мусор как риск безопасности космической деятельности / Е. С. Тесленко // XXXVI Международные Плехановские чтения : Сборник статей участников конференции. В 4-х томах, Москва, 25–27 апреля 2023 года. – Москва: Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 2023. – С. 14–19.
7. Лошкарева Е. Важность развития Системы Контроля Космического Пространства России и Европы для борьбы с космическим мусором / Е. Лошкарева, Т. Б. Радченко // Секция "Актуальные проблемы социально-гуманитарного знания" : Сборник докладов в рамках Московской молодёжной научно-практической конференции, Москва, 21–23 апреля 2015 года / Ответственный редактор: Каллиопин А. К. – Москва: Издательство "Перо", 2015. – С. 62–71.
8. Сирый Р. С. Возможности применения орбитальных систем компьютерного зрения для мониторинга космического мусора / Р. С. Сирый, П. С. Баранов // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XX Конференция молодых учёных, Москва, 14–15 апреля 2023 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. – С. 139–150.
9. Палюх Б. В. Методика выбора способа обеспечения безопасности космического аппарата при возможном воздействии объектов космического мусора / Б. В. Палюх, В. К. Кемайкин, И. В. Кожухин // Мягкие измерения и вычисления. – 2018. – № 8(9). – С. 35–44.
10. Николаева, Е. А. Преодоление астероидной опасности. Методы противодействия астероидной опасности / Е. А. Николаева // 14-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2015" Тезисы, Москва, 16–20 ноября 2015 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 70–72.
11. Камысбаева С. М. Анализ влияния космического мусора на космические объекты / С. М. Камысбаева // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сборник статей по материалам CXLIV студенческой международной научно-практической конференции, Новосибирск, 05 декабря 2024 года. – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью "Сибирская академическая книга", 2024. – С. 73–77.
12. Кулагин В. П. Проблемы астероидной опасности. Современные технологии и способы решения /, А. Ф. Каперко, А. А. Ледков, Б. М. Шустов // Новые информационные технологии : Тезисы докладов XXI Международной студенческой школы-семинара, Судак, 20–27 мая 2013 года / МИЭМ НИУ ВШЭ. – Судак: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2013. – С. 38–40.
13. Орлов П. Ю. Космический мусор как угроза для освоения околоземного космического пространства / П. Ю. Орлов, А. В. Панкин // Конструкторское бюро. – 2017. – № 3. – С. 62–68.
14. Molotov, I. & Sun, R. & Zhang, Chen & Almeida, U. & Zakhvatkin, Mikhail & Titenko, V. & Streltsov, A. & Mokhnatkin, A. & Kokina, T. & Elenin, Leonid. (2019). Russian-Chinese Observations of Fragments of the Destruction of the Centaur Rocket Stage are the First Step to the Network of BRICS Observatories. 95-102. 10.21046/spacedebris2019-95-102.
15. Elenin, L.V., Molotov, I.E. Software for the Automated Control of Robotic Optical Observatories. J. Comput. Syst. Sci. Int. 59, 894–904 (2020). https://doi.org/10.1134/S1064230720040036.
16. Lipunov, V.M., Vladimirov, V.V., Gorbovskoi, E.S. et al. The Concept of a Multi-Functional Astronomy Complex and Dynamically Integrated Database Applied to Multi-Channel Observations with the MASTER Global Network. Astron. Rep. 63, 293–309 (2019). https://doi.org/10.1134/S1063772919040073.
17. Jharbade, P., & Dixit, M. (2022). Detecting Space Debris using Deep Learning Algorithms: A Survey. 883–890. https://doi.org/10.1109/ICIRCA54612.2022.9985622.
18. Erik Blasch, Mark Pugh, Carolyn Sheaff, Joe Raquepas, Peter Rocci, "Big data for space situation awareness," Proc. SPIE 10196, Sensors and Systems for Space Applications X, 1019607 (5 May 2017); https://doi.org/10.1117/12.2264684.