

УДК 629.78:523.6

Геокосмический мониторинг околоземного пространства: перспективные технологии защиты от космического мусора и астероидной опасности

*Колесенков А.Н., Гусев С.И., Аксенов А.А., Кондрашова Т.И., Пасичняк В.Е.
(ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им.
В.Ф. Уткина»)*

Статья представляет комплексный обзор современных систем геокосмического мониторинга околоземного пространства, направленных на обеспечение защиты от космического мусора и астероидной опасности. В рамках обзора рассмотрены существующие и перспективные технологии, включая методы наблюдения, активного удаления угроз и применение информационных систем. Особое внимание уделено роли искусственного интеллекта и автоматизации в повышении эффективности мониторинга.

Ключевые слова: геокосмический мониторинг, обзор, космический мусор, астероидная опасность, астероид, информационные технологии, спутниковые системы наблюдения, космическая безопасность.

1. Введение

Современные вызовы требуют междисциплинарных решений, где информационные технологии играют ключевую роль в обработке данных и управлении системами мониторинга. Околоземное космическое пространство сегодня представляет собой динамически изменяющуюся среду, характеризующуюся растущим присутствием как естественных, так и искусственных объектов. Увеличение количества функционирующих космических аппаратов, рост популяции космического мусора и регулярное обнаружение новых потенциально опасных астероидов (ПОА) создают серьезные вызовы для обеспечения безопасности космической деятельности и защиты Земли от возможных катастрофических последствий столкновений [1].

Геокосмический мониторинг околоземного пространства как комплексная научно-техническая задача включает следующие основные направления [2]:

– обнаружение и каталогизацию объектов искусственного и естественного происхождения;

- определение и прогнозирование их орбитальных параметров;
- оценку рисков столкновений и потенциального ущерба;
- разработку и применение методов защиты от выявленных угроз.

По состоянию на начало 2025 года количество каталогизированных объектов космического мусора размером более 10 см превысило 34 000, в то время как число отслеживаемых потенциально опасных астероидов достигло 2 978. При этом наблюдается устойчивая тенденция к увеличению этих показателей, что обусловлено как совершенствованием средств наблюдения, так и продолжающимся техногенным загрязнением околоземного пространства [3].

Работа выполнена в формате аналитического обзора, систематизирующего последние достижения в области геокосмического мониторинга и защиты от космических угроз. Цель обзора — выделить ключевые технологические тренды, оценить их потенциал и обозначить барьеры внедрения. Материал основан на анализе научных публикаций, данных международных проектов (таких как ISON и «МАСТЕР») и открытых отчетов космических агентств.

2. Современное состояние околоземного космического пространства

Космический мусор включает нефункционирующие искусственные спутники, отработанные ступени ракет-носителей, фрагменты, образовавшиеся в результате столкновений и взрывов, а также технологические элементы, утерянные в процессе космической деятельности. Распределение этих объектов по орбитам и размерам представляет сложную картину, существенно влияющую на долгосрочную устойчивость космической деятельности [4].

Динамика роста количества каталогизированных объектов космического мусора за последние годы отражает как возрастающую активность в космосе, так и совершенствование средств наблюдения [5].

Особую обеспокоенность вызывает рост числа фрагментов, образующихся в результате столкновений и преднамеренных разрушений спутников в ходе испытаний противоспутникового оружия [6].

Потенциально опасными считаются астероиды, которые имеют минимальное расстояние пересечения орбиты с Землей (MOID) менее 0,05 а.е. (~7,5 млн км) и абсолютную

звездную величину $H < 22$ (что соответствует диаметру более 140 м). Столкновение с таким объектом может привести к региональной или глобальной катастрофе.

2.1. Системы мониторинга околоземного пространства

Основу глобальной системы мониторинга околоземного пространства составляют наземные средства наблюдения, включающие оптические телескопы и радиолокационные станции [7].

Космические системы мониторинга обладают рядом преимуществ по сравнению с наземными средствами, включая отсутствие атмосферных искажений, возможность непрерывного наблюдения и более выгодное геометрическое положение относительно наблюдаемых объектов [8].

Эффективный мониторинг околоземного пространства требует интеграции различных систем наблюдения и обмена данными между ними. В настоящее время существует несколько международных инициатив, направленных на координацию усилий в этой области.

2.2 Международные инициативы по координации мониторинга

Эффективный мониторинг околоземного пространства требует глобальной кооперации. Ключевые действующие инициативы включают:

Проект ISON (International Scientific Optical Network)

Крупнейшая международная сеть оптических обсерваторий, объединяющая 23 обсерватории в Европе, Азии, Африке и Америке.

Основные задачи:

- Трекер 10 000+ объектов (GEO, NEO, LEO), включая космический мусор и астероиды.
- Автоматизированное управление телескопами через ПО (например, FORTE) и обработка данных с использованием ИИ.

Сеть обсерваторий БРИКС

Развивается с 2019 года как часть сотрудничества стран БРИКС.

Пример: российско-китайские наблюдения фрагментов ступени «Центавр» — первый шаг к созданию единой сети [14].

Цели: совместные кампании по отслеживанию мусора и опасных астероидов, стандартизация данных.

Программа ESA

ESA's Space Debris Office: координация данных от радиолокаторов и телескопов, включая сотрудничество с ISON.

4. Методы защиты от космического мусора и астероидной опасности

Пассивные методы защиты направлены на минимизацию вероятности образования нового космического мусора и снижение рисков столкновений с существующими объектами.

Активные методы защиты включают в себя системы уклонения от столкновений и технологии активного удаления космического мусора.

Эффективность маневров уклонения зависит от точности определения орбит, своевременности обнаружения угрозы и маневренных возможностей космического аппарата [9].

Основной стратегией защиты от астероидной опасности является раннее обнаружение потенциально опасных объектов и определение их орбитальных и физических характеристик.

Для предотвращения столкновения с Землей потенциально опасного астероида необходимо изменить его траекторию таким образом, чтобы обеспечить пролет на безопасном расстоянии [10].

5. Информационные технологии в системах защиты от космического мусора и астероидной опасности

Современные системы геокосмического мониторинга и защиты от угроз невозможны без применения передовых информационных технологий (ИТ). Они обеспечивают сбор, обработку, анализ и распределение данных, а также автоматизированное управление наблюдательными комплексами.

5.1. Программное обеспечение для управления сетями телескопов

Ключевую роль играют специализированные программные комплексы, координирующие работу распределённых обсерваторий. Среди наиболее успешных примеров:

Проект ISON

Использует автоматизированную систему управления роботизированными оптическими обсерваториями, которая включает:

- планирование наблюдений с учётом погодных условий и приоритетов задач;

- обработку изображений в реальном времени с применением алгоритмов машинного обучения для идентификации объектов;
- интеграцию с базами данных орбитальных параметров для оперативного обновления каталогов [15].

Глобальная сеть «МАСТЕР»

Основана на концепции мультифункционального астрономического комплекса с динамически интегрированной базой данных. Её ПО обеспечивает:

- многоканальные наблюдения (оптические, УФ, радио);
- автоматическое распознавание транзиентных событий (включая потенциально опасные астероиды);
- координацию работы телескопов в разных часовых поясах для непрерывного мониторинга [16].

Под транзиентными событиями в мониторинге околоземного пространства понимаются кратковременные или изменяющиеся явления, такие как:

- вспышки на поверхности объектов (например, отражение солнечного света от вращающегося астероида);
- внезапное появление новых объектов (фрагменты мусора после столкновений, ранее не каталогизированные астероиды);
- аномальные изменения траекторий (резкие маневры спутников, гравитационные возмущения).

5.2. Искусственный интеллект и Big Data в мониторинге

Алгоритмы машинного обучения [17] применяются для:

- Классификации объектов (мусор/астероид/спутник) на основе спектральных и орбитальных характеристик.
- Прогнозирования столкновений с учётом неопределённостей орбит (методы Monte Carlo, нейросетевые модели).

Обработка больших данных [18]:

- Агрегация информации от радиолокаторов, лидаров и телескопов в единые облачные платформы (например, ESA's Space Debris Office).
- Использование графовых баз данных для анализа связей между объектами и фрагментами после столкновений.

5.3. Моделирование и цифровые двойники

Физические симуляторы (например, NASA's ADAM) воспроизводят:

- Динамику облаков мусора после фрагментации.
- Эффективность методов удаления (лазерная абляция, тросовые системы).
- Цифровые двойники астероидов помогают тестировать стратегии отклонения, учитывая состав и структуру объекта.

6. Перспективные технологии

Развитие технологий мониторинга околоземного пространства (табл. 1) идет по пути повышения чувствительности датчиков, расширения зоны наблюдения и автоматизации процессов обнаружения и сопровождения объектов [11].

Некоторые методы требуют уточнения терминологии:

Абляция (от лат. *ablatio* — «удаление») — процесс удаления вещества с поверхности объекта под воздействием внешних факторов (лазерного излучения, трения об атмосферу и др.). В контексте борьбы с космическим мусором и астероидами используется для изменения орбиты объекта за счёт импульса от испарения его материала.

Импактор (от англ. *impact* — «удар») — аппарат, предназначенный для столкновения с объектом (например, астероидом) с целью передачи кинетической энергии и изменения его траектории.

Таблица 1. Перспективные технологии мониторинга околоземного пространства

Технология	Принцип действия	Потенциальные преимущества	Временной горизонт внедрения
ИТ-платформы для распределённого мониторинга	Агрегация данных с глобальных сетей телескопов и радаров	Высокая скорость обработки, минимизация «слепых» зон	2-3 года
Многопозиционные радиолокационные системы	Использование разнесенных передатчиков и приемников	Повышение чувствительности, снижение энергопотребления	3-5 лет
Квантовые датчики	Использование квантовых эффектов для повышения	Обнаружение более мелких объектов	10-15 лет

	чувствительности		
Космические лидары	Активное лазерное зондирование из космоса	Высокая точность определения расстояния и скорости	5-8 лет
Сверхширокополосные радары	Использование сигналов с очень широким спектром	Высокое разрешение по дальности	5-7 лет
Распределенные группировки малых спутников	Координированная работа множества малых КА	Непрерывное глобальное покрытие, устойчивость к отказам	3-6 лет
Адаптивная оптика космического базирования	Коррекция искажений в режиме реального времени	Повышение разрешающей способности оптических систем	7-10 лет
Гиперспектральное зондирование	Анализ излучения в сотнях спектральных каналов	Определение состава и структуры объектов	4-7 лет
Искусственный интеллект для автоматического обнаружения	Применение методов машинного обучения	Повышение эффективности обнаружения, снижение ложных тревог	2-4 года

Развитие технологий защиты от космического мусора (табл. 2) направлено на повышение эффективности удаления существующих объектов и предотвращение образования нового мусора [12].

Таблица 2. Перспективные технологии активного удаления космического мусора

Технология	Принцип действия	Потенциальные преимущества	Временной горизонт внедрения
Электродинамические тросовые системы	Использование взаимодействия	Не требует расхода рабочего тела,	5-8 лет

	проводящего троса с магнитным полем Земли	эффективно для низких орбит	
Роботизированные системы с искусственным интеллектом	Автономные роботы с продвинутыми алгоритмами распознавания и захвата	Повышение эффективности захвата некооперативных объектов	7-10 лет
Многоразовые буксиры на электрореактивных двигателях	КА многократного использования для последовательного увода нескольких объектов	Экономическая эффективность	5-8 лет
Лазерные системы наземного базирования	Мощные лазеры для абляции поверхности объектов	Возможность воздействия на множество мелких фрагментов	8-12 лет
Пена для замедления объектов	Распыление специальной пены, увеличивающей аэродинамическое сопротивление	Пассивный метод, не требующий точного наведения	10-15 лет
Самовосстанавливающиеся защитные экраны	Материалы, способные "залечивать" повреждения от ударов	Повышение долговечности КА в условиях загрязненных орбит	10-15 лет
Универсальный интерфейс для будущего обслуживания	Стандартизированные точки захвата и стыковки на всех КА	Упрощение будущего обслуживания и удаления	3-5 лет

Развитие технологий защиты от астероидной опасности (табл. 3) направлено на повышение эффективности воздействия на астероиды различных размеров и составов [13].

Таблица 3. Перспективные технологии защиты от астероидной опасности

Технология	Принцип действия	Потенциальные преимущества	Временной горизонт внедрения

Ядерные взрывные устройства направленного действия	Фокусировка энергии взрыва в заданном направлении	Повышение эффективности передачи импульса	10-15 лет
Высокоскоростные кинетические импакторы (>30 км/с)	Использование гравитационных маневров и передовых двигательных технологий	Значительное увеличение передаваемого импульса	7-10 лет
Лазерные системы космического базирования	Высокомощные лазеры для абляции поверхности астероида	Возможность длительного контролируемого воздействия	15-20 лет
Гравитационные тракторы с дополнительным воздействием	Комбинация гравитационного воздействия с ионными двигателями, направленными на астероид	Повышение эффективности гравитационного трактора	10-15 лет
Проникающие устройства с термоядерными зарядами	Устройства, способные проникать вглубь астероида перед детонацией	Повышение эффективности передачи энергии	15-20 лет
Роевые системы воздействия	Множество малых КА, координированно воздействующих на астероид	Адаптивность, устойчивость к отказам	15-20 лет

7. Заключение

Проведенный обзор демонстрирует, что геокосмический мониторинг околоземного пространства и разработка методов защиты от космического мусора и астероидной опасности представляют собой комплексную научно-техническую проблему, решение которой требует междисциплинарного подхода и международного сотрудничества. Развитие информационных технологий — от автоматизированных систем управления телескопами (ISON, MASTER) до AI-аналитики Big Data — становится критическим фактором в повышении точности и оперативности реагирования на космические угрозы. Дальнейшая

интеграция информационных технологий с аппаратными комплексами, включая квантовые вычисления для ускорения орбитальных расчётов, определит конкурентоспособность защитных систем в ближайшее десятилетие.

Проведенный в статье анализ показывает, что:

– Современное состояние околоземного пространства характеризуется устойчивым ростом популяции космического мусора, что создает возрастающие риски для функционирующих космических аппаратов. При этом наблюдается увеличение темпов запусков новых спутников, особенно в составе крупных группировок.

– Системы мониторинга космического мусора и астероидной опасности активно развиваются, но все еще имеют ограничения по обнаружению и каталогизации объектов малых размеров. Полнота каталогизации космического мусора размером менее 10 см на низких орбитах и менее 1 м на геостационарной орбите остается недостаточной.

– Потенциально опасные астероиды размером более 140 м обнаружены примерно на 56%, что оставляет значительную неопределенность в оценке астероидной угрозы. При этом для объектов размером менее 100 м полнота обнаружения составляет менее 30%.

– Технологии активной защиты от космического мусора находятся на стадии демонстрационных миссий и пока не применяются в промышленных масштабах. Наиболее перспективными представляются технологии контактного захвата для крупных объектов и бесконтактные методы для множественного воздействия на мелкие фрагменты.

– Методы защиты от астероидной опасности прошли первую успешную демонстрацию, но требуют дальнейшего развития для обеспечения эффективности при различных сценариях угрозы. Комбинированные подходы, включающие кинетическое, гравитационное и взрывное воздействие, представляются наиболее перспективными.

– Международное сотрудничество в области мониторинга и защиты от космических угроз расширяется, но сохраняются значительные политические и организационные барьеры. Требуется совершенствование международно-правовой базы и механизмов координации усилий.

– Перспективные технологии мониторинга и защиты могут существенно повысить эффективность противодействия космическим угрозам, но требуют значительных инвестиций и международной кооперации для своевременной разработки и внедрения.

Список литературы

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 космического 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, 15–14 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>.