Научно-производственная статья
УДК 528.8:629.78:621.9.048

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ЗАЩИТЫ ОПТИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ МИКРОМЕТЕОРНОЙ ЭРОЗИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКИ

М.Н. Кокоев[1,*]

[1] Кабардино-Балкарский Государственный университет, г. Нальчик, Россия
[*] E-mail: kbagrostroy@yandex.ru

Аннотация. Долговечность и стабильность оптических характеристик аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются решающим фактором, определяющим эффективность космической геологоразведки. Прогрессирующая деградация оптических поверхностей под воздействием потоков микрометеороидов приводит к необратимому ухудшению качества мультиспектральных данных, что значительно снижает точность спектрального анализа и геологического дешифрования. Предлагается способ защиты, основанный на создании самовосстанавливающегося слоя специальной жидкости на поверхности оптических элементов. Физической основой метода является управление межфазными явлениями в условиях невесомости, обеспечивающее формирование и стабилизацию жидкого слоя заданной толщины в пределах лиофобного барьера. Сформулирован комплекс требований к защитной жидкости, основными из которых являются низкое давление паров, радиационная стойкость, химическая инертность, а также минимальное поглощение в спектральных диапазонах, используемых для идентификации пород. В качестве перспективного материала рассмотрены кремнийорганические жидкости (олигоорганосилоксаны). Описана принципиальная схема системы подачи и регенерации жидкости на орбите. Показано, что реализация предложенного способа защиты позволяет значительно увеличить ресурс оптики космических аппаратов ДЗЗ. Это способствует повышению достоверности и экономической эффективности геологоразведочных работ.

Ключевые слова: *геологоразведка; космос; оптика; микрометеорная эрозия; защитная жидкость; излучение; невесомость.*

Для цитирования: Кокоев М.Н. Разработка способа защиты оптики космических аппаратов от микрометеорной эрозии для повышения эффективности геологоразведки // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 4. С. 97-106.

Scientific-production article

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PROTECTING SPACECRAFT OPTICS FROM MICROMETEOROID EROSION TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF GEOLOGICAL EXPLORATION

M.N. Kokoev[1,*]

[1] Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia
[*] E-mail: kbagrostroy@yandex.ru

Abstract. The longevity and stability of the optical characteristics of remote sensing equipment are decisive factors determining the effectiveness of space-based geological exploration.

© Кокоев М.Н. 2025

The progressive degradation of optical surfaces under the influence of micrometeoroid fluxes leads to an irreversible deterioration in the quality of multispectral data, which significantly reduces the accuracy of spectral analysis and geological interpretation. A protection method is proposed, based on the creation of a self-healing layer of a special liquid on the surface of optical elements. The physical basis of the method is the management of interfacial phenomena under microgravity conditions, ensuring the formation and stabilization of a liquid layer of a specified thickness within a lyophobic barrier. A set of requirements for the protective liquid is formulated, the main ones being low vapor pressure, radiation resistance, chemical inertness, as well as minimal absorption in the spectral ranges used for rock identification. Organosilicon liquids (oligoorganosiloxanes) are considered as a promising material. A schematic diagram of the on-orbit fluid delivery and regeneration system is described. It is shown that the implementation of the proposed protection method can significantly increase the service life of remote sensing spacecraft optics. This contributes to increased reliability and cost-effectiveness of geological exploration operations.

Key words: *geological exploration; space; optics; micrometeor erosion; protective liquid; radiation; microgravity.*

For citation: Kokoev M.N. Development of a method for protecting spacecraft optics from micrometeoroid erosion to improve the efficiency of geological exploration // *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 4, pp. 97-106.

Введение

Несмотря на прогнозы многих экономистов, что в следующем году мировую экономику ожидает рецессия и даже экономический кризис, порожденный двумя годами пандемии и последующим резким обострением политической обстановки, спрос на углеводороды на мировом рынке заметно не снижается. Однако потребность энергетики в нефти и газе в ближайшие годы ожидает падение. Это случится во многих технологически развитых странах при успешном "зеленом" переходе на возобновляемые источники энергии. Но помимо энергетики, продолжает работать нефтехимическая промышленность, которая еще долго будет нуждаться в нефти и газе для производства миллионов тонн пластмасс и смазочных масел и многих других продуктов на основе углеводородов. Как бы ни сложилась судьба экономических прогнозов и "зеленого" перехода, геологическая разведка продолжает свою работу, невзирая на колебания спроса на углеводороды. Тем более, от геологоразведки новых нефтегазовых месторождений до поступления на рынок нефти и газа проходит 10-15 лет.

Известно, что эффективность геологоразведки с применением космических технологий находится в зависимости от качества и долговременной стабильности получаемых данных дистанционного зондирования. Высокодетальная мультиспектральная съемка, являющаяся основой для структурного анализа, идентификации типов пород и прогнозирования месторождений, предъявляет исключительно высокие требования к сохранению оптических характеристик бортовой аппаратуры на протяжении всего срока активного существования космического аппарата. Однако указанные характеристики подвергаются прогрессирующей деградации под воздействием потоков микрометеороидов и частиц техногенного происхождения.

Постепенное помутнение оптических поверхностей, возникновение микроскопических дефектов и связанное с этим увеличение рассеяния света приводят к необратимому снижению контраста и точности спектральных измерений. Таким образом, проблема микрометеорной эрозии оптических систем приобретает существенное значение для экономической целесообразности и технической успешности геологоразведочных работ, осуществляемых с орбиты. Обеспечение стабильности оптических свойств систем дистанционного зондирования становится необходимым условием, без решения которого потенциал космической геологоразведки не может быть реализован в полной мере.

Целью статьи является разработка способа защиты оптических приборов от микрометеорной эрозии на основе самовосстанавливающейся поверхности тонкого слоя специальной жидкости, наносимой на защищаемую поверхность. Для достижения указанной цели необходимо выполнить аналитическое исследование возможности применения самовосстанавливающейся поверхности тонкого слоя специальной жидкости, наносимой на защищаемую поверхность, которая будет устойчива к солнечному и космическому излучениям.

В России имеется огромный потенциал для применения космических технологий в геологоразведке, особенно в нефтегазовом секторе. Материалы космической съемки позволяют исследовать большие и труднодоступные территории, особенно в арктической зоне России, где, по прогнозам, залегают большие нефтегазовые месторождения [1, 2]. Снимки из космоса служат источником информации для геологических прогнозов и обеспечивают наглядность при отображении результатов исследований. В космической геологоразведке используются такие направления, как структурный анализ изучаемой поверхности для оценки глубинного залегания пород, изучение свойств полезных ископаемых посредством спектрального анализа, прогнозирование мест залегания пород, подсчет запасов, разработка карт, актуализация и анализ геологических аномалий и изменений, отслеживание состояния экзогенных геологических процессов. Современные технологии обработки данных позволяют получать информацию со спутника в течение нескольких часов. Анализ спектральных снимков, которые содержат около 200 спектральных каналов в видимом и инфракрасном диапазонах, помогает определить тип и характеристики породы на поверхности с точными координатами на местности [3].

Методика и результаты исследования

Благодаря тесным научно-практическим связям с НАСА максимальное развитие геологоразведка из космоса получила в США. В первую очередь крупные американские компании GeoEye и DigitalGlobe. Наиболее известные космические системы для дистанционного зондирования Земли: Landsat 7, Landsat 8, Terra/Aster и WorldView-3 [4]. Например, Landsat 8 для съемки геологического района с углом поля зрения, равным 1,28 градуса, имеет главное зеркало диаметром 110 см с фокусным расстоянием 13,3 м.

Оптика для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) конструктивно может быть линзовой (рефрактор), зеркальной (рефлектор) и зеркально-линзовой. Вообще для ДЗЗ в отечественной практике применяются все упомянутые типы оптических приборов. Они сделаны по высшему классу точности. Поэтому стоят дорого, например метровое зеркало с основой из углепластика стоит около 1 млн. долларов.

Как долго может служить линзовая оптика и обеспечивать качественные снимки, подвергаемая воздействию микрометеорного потока? Для начала разберемся с терминами. Что такое метеороид, метеор и метеорит? Метеороид - объект значительно меньше астероида, имеющий размеры обычно от 30 мкм и поперечником до одного метра. Иногда такая песчинка размером много меньше 1 миллиметра может выбить большой кратер в толстом стекле. Правда вероятность такой встречи в космосе ничтожно мала. Тем не менее, космонавты Джанибеков и Савиных, в 1985 году спасавшие станцию "Салют-7" после отсутствия на ней людей в течение 8 месяцев, по прибытию на станцию обнаружили на иллюминаторе с внешней стороны каверну от микрометеорита глубиной около 8 мм. А сами стекла иллюминаторов имели толщину всего 10 мм [5].

В 2017 году Международный астрономический союз решил, что объекты меньше 30 мкм классифицируются как микрометеороиды и межпланетная пыль [6]. Центр малых планет, это подразделение NASA, термин "метеороид" не использует [7]. Метеороиды, которые сгорают в атмосфере, так называемые "падающие звезды", называются *метеоры.* Метеоры обычно сгорают в атмосфере на высоте от 76 до 100 км. Остатки не сгоревших метеороидов, которые долетели до поверхности Земли, называются *метеоритами.* Ежегодно

в атмосферу Земли попадает около 15000 тонн космических тел - от песчинок до крупных камней [8].

Скорость соударения микрометеорного потока с космическим аппаратом (КА) от 10 до 72 км/с [9], если только метеороид не прибыл из межзвездного пространства. Тогда его скорость теоретически может быть еще больше. Скорость соударения с преградой зависит от сложения векторных скоростей микрометеорного потока и КА.

Микрометеорные частицы повреждают поверхность из любого материала, независимо от его механической прочности и твердости. Действительно, кинетическая энергия соударения большинства микрометеорных частиц с преградой такова, что ее достаточно не только для разрушения и испарения самой частицы, но и материала преграды в месте удара. Поэтому объем повреждений чаще определяется теплофизическими свойствами преграды, чем ее механической прочностью.

В зоне удара микрометеорных частиц со скоростью выше 10 км/с о стекло оптического прибора возникает давление более 15 ГПа (150 тыс. атмосфер) [10]. Стекло в месте удара превращается в порошок, состоящий из микронных осколков. Объем осколков обычно в 100...1000 раз может превышать объем микрометеора. Эти частицы в течение некоторого времени (от 15 минут до суток) сопровождают космический аппарат в виде пылевого облака, создавая оптические помехи для фотосъемки из-за отражения солнечного света. Постепенно диффундируя в окружающий космос, эти осколки становятся техногенной составляющей космического мусора на орбите.

Вероятность встречи метеорных частиц с КА является достаточно высокой только для весьма малых частиц с массой порядка 10^{-6} г (1 мкг) и при продолжительности полета более года. При уменьшении массы частиц до 10^{-11}...10^{-12} кг плотность микрометеорного потока резко возрастает в сотни и тысячи раз. Кроме того, на околоземной орбите скапливается всё большее количество субмикронных высокоскоростных частиц искусственного происхождения, которые при столкновении с оптикой КА также повреждают её поверхность [1].

Наиболее пагубно воздействие микрометеорных и техногенных частиц на объективы фотокамер, оптико-электронных приборов (ОЭП) астроориентации и навигации, иллюминаторов и солнечных батарей [11, 12]. Продолжительное действие метеорных частиц приводит к помутнению объективов и иллюминаторов. Метеорная бомбардировка внешних оптических поверхностей ведет к возрастанию рассеяния, которое может достигать у ОЭП астроориентации и навигации КА, работающего в видимом диапазоне спектра до 50 % за 2 года с момента начала бомбардировки.

Для ОЭП астроориентации и навигации КА, работающих в инфракрасном диапазоне, последствия матирующего воздействия на поверхности оптических деталей сказываются меньше. Поскольку, чем больше длина электромагнитной волны, тем меньше сказывается матирующее действие поврежденной внешней поверхности оптики на качество изображения. Но для мультиспектральной съемки в интересах геологоразведки, включая всю видимую часть спектра, матирующее действие оптических поверхностей от микрометеорного потока сказывается весьма отрицательно.

Воздействие микрометеорной эрозии на качество данных носит нелинейный характер и негативно сказывается на решении прикладных задач геологоразведки. В аспектах мульти- и гиперспектральной съемки, являющейся основным инструментом дешифрирования, незначительное помутнение оптики и рост светорассеяния приводят к искажению спектральных подписей минералов. Это приводит к снижению достоверности идентификации пород, что влияет на точность прогнозирования мест залегания углеводородов.

Для структурного анализа, направленного на выявление ловушек, деградация оптики оборачивается утратой детальности и снижением разрешения. Это не позволяет уверенно идентифицировать тектонические нарушения и элементы складчатости малых амплитуд.

Последствия выражаются не только в увеличении доли ошибок при построении геологических моделей, но также в существенных финансовых и временных затратах, связанных с необходимостью дублирования съемок или проведением дорогостоящих наземных и аэрогеофизических работ для перепроверки искаженных космических данных. Таким образом, деградация оптики из-за микрометеорной эрозии ощутимо снижает экономическую эффективность всего цикла геологоразведочных работ.

Снижение рабочих характеристик оптических приборов КА ниже известного предела означает прекращение практического использования с целью ДЗЗ в интересах геологической разведки, метеорологии, экологии и др. Применение различных защитных экранов и шторок для защиты объективов решает проблему лишь отчасти, так как использование шторок противодействует эрозии только тогда, когда прибор не работает. Конечно, когда объектив фотокамеры смотрит прямо вниз (надир) и поле зрения объектива ограничено видимым горизонтом Земли, тогда метеорные потоки не могут попасть в объектив. Но работая на высокой орбите, когда всё поле зрения объектива или часть его не экранируется Землей, тогда метеорные частицы могут повредить поверхность объектива.

Новый способ защиты оптических приборов и других элементов КА от микрометеорной эрозии базируется на применении самовосстанавливающейся поверхности тонкого слоя специальной жидкости, наносимой на защищаемую поверхность. Выбор метода защиты в данном случае обусловлен спецификой эксплуатации оптических систем в интересах геологоразведки. Применение механических защитных шторок, решающих проблему эрозии в нерабочие периоды, является неприемлемым для аппаратов, выполняющих задачи непрерывного мониторинга и плановой съемки обширных территорий, так как их активация приводит к нежелательным перерывам в получении информации. Твердые защитные покрытия, несмотря на свою стабильность, не обладают свойством самовосстановления, и накопление повреждений на их поверхности носит необратимый кумулятивный характер. Это в конечном итоге ведет к потере качества данных.

В отличие от указанных подходов, предлагаемый метод с использованием самовосстанавливающегося жидкого слоя обеспечивает не периодическое, а постоянное и активное сохранение оптических поверхностей в исходном состоянии непосредственно в процессе съемки. Это позволяет поддерживать стабильность метрологических характеристик оптико-электронной аппаратуры на высоком уровне на протяжении всего срока активного существования космического аппарата. Реализация метода возможна благодаря совместному применению физики межфазных явлений и такого явления, как невесомость.

Дело в том, что специально подобранная жидкость в невесомости образует равномерный тонкий слой, благодаря смачиванию защищаемой поверхности в границах лиофобного периметра. Лиофобный периметр объектива или другой поверхности делают из несмачиваемого материала, например тефлона или другого подходящего материала. Толщины слоя защитной жидкости в интервале 0,5... 1 мм достаточно для поглощения кинетической энергии микрометеорной частицы.

Энергия частицы расходуется на её разрушение, на испарение материала частицы и защитной жидкости, а также на создание ударной волны в жидкости. Например, при массе каменно-железной метеорной частицы 110^{-10} г её поперечный размер будет около 3 мкм. При толщине слоя защитной жидкости 1 мм размер частицы более чем в 300 раз превышает толщину защитной жидкости. Давление во фронте ударной волны уменьшается обратно пропорционально кубу расстояния от места удара метеорной частицы по жидкости. Следовательно, к защищаемой поверхности ударная волна подойдет сильно ослабленной и стекло объектива останется неповрежденным. Возмущение, вызванной ударом частицы, на абсолютно ровной поверхности жидкости, не влияет на качество изображения. Поскольку столь редкое явление как одновременный удар многих частиц по объективу маловероятен. Через доли секунды поверхность жидкости становится молекулярно гладкой за счет сил поверхностного натяжения. Часть осколков разрушенной микрометеорной частицы попадет

в жидкость. При периодической регенерации защитной жидкости они остаются на фильтре тонкой очистки.

Исследованиями необходимо найти защитную жидкость, которая удовлетворяла бы всем жестким условиям длительной работы в открытом космосе. Защитная жидкость должна обладать следующими свойствами:

1. Она должна иметь давление паров не выше 10^{-7} Па, что исключало бы заметную потерю массы за долгое время работы в условиях высокого вакуума;
2. Жидкость должна хорошо смачивать защищаемую поверхность, краевой угол смачивания должен быть не больше 45^0;
3. Жидкость должна быть лиофобной из подобранного конструкционного материала с целью создания барьера для ограничения растекания жидкости. Кроме тефлона (фторопласта) должны быть аналоги.
4. Жидкость должна обладать стойкостью к солнечному облучению и космическому излучению - не подвергаться термической деструкции, не быть склонной к полимеризации. Это самое трудное требование в поиске подходящей жидкости;
5. Она должна сохранять текучесть в широком интервале рабочих температур и иметь малую зависимость вязкости от температуры;
6. Иметь минимальное поглощение в важной для данного прибора области оптического или инфракрасного излучения;
7. Жидкость должна быть не токсичной и не горючей;
8. Жидкость должна быть инертной по отношению к конструкционным материалам КА и продуктам разрушения микрометеоров.
9. Должна сохранять служебные свойства при длительных сроках хранения в условиях работы КА на орбите.

В достаточной мере этим требованиям соответствуют некоторые кремнийорганические жидкости - олигоорганосилоксаны. Некоторые марки из них работают в высоковакуумных насосах [13]. Многие из них сохраняют текучесть в диапазоне температур от 143 К до 573 К и выше. Большинство кремнийорганических жидкостей в нормальных условиях смачивают кварц, стекла и другие материалы, однако для определения углов смачивания указанными жидкостями стекол и просветляющих покрытий в широком интервале температур в условиях глубокого вакуума и интенсивного солнечного облучения необходимо проведение дополнительных исследований.

Показатель преломления кремнийорганических жидкостей для D-линии натрия (волна 589,3 нм) находится в интервале от 1,38 до 1,42. Для сравнения - показатель преломления для большинства оптических стекол различных марок лежит в интервале 1,45... 1,9. Давление пара олигоорганосилоксанов при нормальной температуре находится в диапазоне 10^{-7} ... 10^{-9} Па [14], что сравнимо с давлением в космосе на высоте 500 км - $9 \cdot 10^{-7}$ Па. То есть олигоорганосилоксаны могут работать в космосе не испаряясь. Известны и другие синтетические жидкости, свойства которых представляют интерес для возможного использования их в космосе.

Устройство для защиты оптических поверхностей начинает работу после вывода КА на орбиту и завершения всех маневров, сопровождаемых разного рода ускорениями. В условиях невесомости на линзу объектива автоматически подается дозированное количество жидкости из емкости для хранения запаса. За счет смачивания жидкость растекается по поверхности линзы равномерным слоем заданной толщины в пределах лиофобного кольца. В условиях невесомости слой жидкости на всей поверхности строго одинаков по толщине и не зависит от ориентации защищаемой поверхности в пространстве.

Толщина защитного слоя определяется исключительно отношением количества жидкости к площади защищаемой поверхности. Для точного расчета количества защитной жидкости возможна поправка на объем мениска на линии её контакта с лиофобным

барьером. Вообще, особенности работы защитного слоя в условиях невесомости позволяют увеличить его толщину в случае необходимости до 2 мм. Верхний предел возможной толщины защитного слоя ограничивается физическими характеристиками жидкости моментом возникновения капиллярных волн на его поверхности при случайном появлении вибрационных или иных ускорений [15,16].

Регенерация защитной жидкости заключается в очистке ее от микроскопических продуктов разрушения метеорных частиц, а также в удалении из неё следов высокомолекулярных соединений, которые могут возникать в олигоорганосилоксанах под действием жесткого солнечного ультрафиолета и длительного воздействия космического излучения. Периодическая медленная циркуляция защитной жидкости необходима также для предотвращения образования тонких полимерных пленок на межфазной границе "жидкость-твердое тело" под действием различных видов облучения. Незначительные потери защитной жидкости за счет ее испарения и полимеризации восполняются из бортовых запасов [16, 17].

О каком количестве жидкости идет речь для защиты от микрометеорной эрозии одного объектива? Плотность кремнийорганической жидкости марки ХС-2-I 1100 кг/м^3. Для получения защитного слоя толщиной 1 мм на объективе с входной линзой, например, диаметром 100 мм нужно всего 8,6 г жидкости. Очевидно, что оптимальную толщину защитного слоя и тип защитной жидкости для различных систем и устройств КА можно определить на основе проведения соответствующих НИР. Требует изучения влияние длительного воздействия атомарного кислорода и других факторов открытого космоса на служебные свойства защитной жидкости.

Перед выполнением маневров КА на орбите, сопровождаемых ускорениями, защитные жидкости должны временно убираться с оптических поверхностей в закрытые резервуары для исключения их растекания за пределы защищаемых поверхностей и возможной потери. В условиях невесомости и вакуума обычный отсос жидкости невозможен. Поэтому отбор защитной жидкости с оптической поверхности перед выполнением маневров и для её последующей регенерации должен проводиться устройством, работа которого основана на смачивании и пропитке пористого подвижного элемента, перемещающего жидкость в фильтр тонкой очистки. Для облегчения перемещения жидкости по циркуляционному тракту, систему регенерации предпочтительно включать в те периоды, когда температура защищаемых оптических и иных поверхностей способствует снижению вязкости жидкости.

Заключение

1. Разработан новый способ защиты оптики космических аппаратов от микрометеорной эрозии, основанный на создании самовосстанавливающегося слоя специальной жидкости на защищаемой поверхности. Решающим преимуществом метода перед механическими шторками и твердыми покрытиями является обеспечение постоянной защиты непосредственно в процессе съемки, что принципиально важно для аппаратов непрерывного мониторинга.

2. Физической основой метода является управление межфазными явлениями в условиях невесомости, что обеспечивает формирование и стабилизацию жидкого слоя заданной толщины (0,5–2 мм) в пределах лиофобного барьера. Расчеты показывают, что даже слой толщиной 1 мм способен поглотить кинетическую энергию частицы размером ~3 мкм, предотвращая повреждение оптического элемента.

3. Сформулирован комплекс требований к защитной жидкости, определяющих ее работоспособность в условиях открытого космоса: низкое давление паров (не выше 10^{-7} Па), радиационная стойкость, химическая инертность, минимальное поглощение в рабочих спектральных диапазонах, а также управляемые свойства смачивания. В качестве перспективного материала, в наибольшей степени отвечающего этим требованиям, идентифицированы кремнийорганические жидкости (олигоорганосилоксаны).

4. Описана принципиальная схема системы, включающая дозированную подачу жидкости на оптику в условиях невесомости, ее периодическую регенерацию для удаления продуктов разрушения частиц и предотвращения полимеризации, а также механизм удаления жидкости перед маневрами КА.

5. Реализация предложенного способа позволит значительно увеличить ресурс и сохранить стабильность оптических характеристик аппаратуры ДЗЗ на протяжении всего срока активного существования космического аппарата. Это, в свою очередь, способствует повышению достоверности геологической интерпретации данных и экономической эффективности всего цикла разведочных работ, особенно на труднодоступных территориях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Береговой, Г.Т., Ярополов, В.И., Баранецкий, И.И. Справочник по безопасности космических полетов. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.

2. Госкорпорация «Росатом» вышла на рынок ветроэнергетики в 2016 году. URL: https://rosatom.ru/production/vetroenergetika/ (дата обращения: 10.02.2025).

3. Аковецкий, В.Г. Космические мониторинговые наблюдения нефтегазопроявлений морских акваторий: геологические и геоэкологические аспекты // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 4(23). С. 72.

4. Космос и геология: перспективные технологии для геологоразведки. Мультиспектральное дистанционное зондирование территории. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/20/2430/htm (дата обращения: 27.10.2022).

5. Как спасали "Салют". 2017. URL: https://topwar.ru/127699-kak-spasali-salyut.html (дата обращения: 27.10.2023).

6. Beech, M., Steel, D. On the Definition of the Term Meteoroid // Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society. 1995. Vol. 36, No. 3, pp. 281-284.

7. Rubin, A.E., Grossman, J.N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions // Meteoritics & Planetary Science. 2010. Vol. 45, No. 1, pp. 114-122.

8. Interagency Group (Space) Working Group on Orbital Debris. Report on Orbital Debris. NASA Technical Reports Server, 1989. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19900003319 (дата обращения: 15.06.2025).

9. Jenniskens, P. Земля столкнулась с небольшой кометой [Earth collides with a small comet]. URL: https://web.archive.org/web/20130128052127/http://www.seti.org/seti-institute/news/earth-collides-with-comet (дата обращения: 27.10.2022).

10. Мержлевский, Л.А., Титов, В.Н., Фадеенко, Ю.И., Швецов, Г.А. Высокоскоростное метание твёрдых тел // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5, С. 77-91.

11. Utreja, L.R. Space debris - Status, concerns and solutions // IAF, International Astronautical Congress 40-th. Malaga, Spain, Oct. 7-13, 1989. IAF Paper 89-625. 7 p.

12. Vollrath, K., Thomer, G. Kurzzeitphysik. T. 2. Springer-Verlag, Wein, New York, 1967. 352 s.

13. Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение / Под ред. Соболевского, М.В. М.: Химия, 1985. 248 с.

14. Уэстон, Дж. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1988. 325 с.

15. Chinese Government Confirms 24.4 Gigawatts Worth Of New Solar In H1'17 [Правительство Китая подтверждает, что новая солнечная энергия достигнет 24,4 гигаватт в первом полугодии 2017 года]. URL: https://cleantechnica.com/2017/08/08/china-government-confirms-24-4-gw-worth-new-solar-1h17/ (дата обращения: 15.06.2022).

16. Использование космических технологий в геологоразведке. URL: https://nangs.org/news/upstream/ispolzovanie-kosmicheskikh-tekhnologij-v-geologorazvedke (дата обращения: 27.10.2024).

17. Wind energy in Europe in 2019. Trends and statistics [Энергия ветра в Европе в 2019 г. Тенденции и статистика]. 2020. URL: https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-ind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2019.pdf (дата обращения: 15.06.2022).

REFERENCES

1. Beregovoj, G.T., Yaropolov, V.I., Baraneckij, I.I. Spravochnik po bezopasnosti kosmicheskikh poletov [Handbook on space flight safety]. M.: Mashinostroenie, 1989. 336 p.

2. Goskorporaciya «Rosatom» vyshla na rynok vetroenergetiki v 2016 godu [State Corporation "Rosatom" entered the wind energy market in 2016]. URL: https://rosatom.ru/production/vetroenergetika/ (data obrashcheniya: 10.02.2025).

3. Akoveckij, V.G. Kosmicheskie monitoringovye nablyudeniya neftegazoprojavlenij morskikh akvatorij: geologicheskie i geoekologicheskie aspekty [Space monitoring observations of oil and gas manifestations in marine areas: geological and geoecological aspects]. Aktual'nye problemy nefti i gaza. 2018. No. 4(23). P. 72.

4. Kosmos i geologiya: perspektivnye tekhnologii dlya geologorazvedki. Mul'tispektral'noe distancionnoe zondirovanie territorii [Space and geology: promising technologies for geological exploration. Multispectral remote sensing of the territory]. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/20/2430/htm (data obrashcheniya: 27.10.2022).

5. Kak spasali "Salyut" [How they saved "Salyut"]. 2017. URL: https://topwar.ru/127699-kak-spasali-salyut.html (data obrashcheniya: 27.10.2023).

6. Beech, M., Steel, D. On the Definition of the Term Meteoroid. Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society. 1995. Vol. 36, No. 3, pp. 281-284.

7. Rubin, A.E., Grossman, J.N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. Meteoritics & Planetary Science. 2010. Vol. 45, No. 1, pp. 114-122.

8. Interagency Group (Space) Working Group on Orbital Debris. Report on Orbital Debris. NASA Technical Reports Server, 1989. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/19900003319 (data obrashcheniya: 15.06.2025).

9. Jenniskens, P. Zemlya stolknulas' s nebol'shoj kometoj [Earth collides with a small comet]. URL: https://web.archive.org/web/20130128052127/http://www.seti.org/seti-institute/news/earth-collides-with-comet (data obrashcheniya: 27.10.2022).

10. Merzhlevskij, L.A., Titov, V.N., Fadeenko, Yu.I., Shvecov, G.A. Vysokoskorostnoe metanie tverdykh tel [High-speed throwing of solid bodies]. Fizika goreniya i vzryva. 1987. Vol. 23, No. 5, pp. 77-91.

11. Utreja, L.R. Space debris - Status, concerns and solutions. IAF, International Astronautical Congress 40-th. Malaga, Spain, Oct. 7-13, 1989. IAF Paper 89-625. 7 p.

12. Vollrath, K., Thomer, G. Kurzzeitphysik. T. 2. Springer-Verlag, Wein, New York, 1967. 352 p.

13. Oligoorganosiloksany. Svojstva, poluchenie, primenenie [Oligoorganosiloxanes. Properties, production, application]. Pod red. Sobolevskogo, M.V. M.: Khimiya, 1985. 248 p.

14. Ueston, Dzh. Tekhnika vysokogo vakuuma [High vacuum technology]. M.: Mir, 1988. 325 p.

15. Chinese Government Confirms 24.4 Gigawatts Worth Of New Solar In H1'17 [Pravitel'stvo Kitaya podtverzhdaet, chto novaya solnechnaya energiya dostignet 24,4 gigavatt v pervom polugodii 2017 goda]. URL: https://cleantechnica.com/2017/08/08/china-government-confirms-24-4-gw-worth-new-solar-1h17/ (data obrashcheniya: 15.06.2022).

16. Ispol'zovanie kosmicheskikh tekhnologij v geologorazvedke [Use of space technologies in geological exploration]. URL: https://nangs.org/news/upstream/ispolzovanie-kosmicheskikh-tekhnologij-v-geologorazvedke (data obrashcheniya: 27.10.2024).

17. Wind energy in Europe in 2019. Trends and statistics [Energiya vetra v Evrope v 2019 g. Tendencii i statistika]. 2020. URL: https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-ind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2019.pdf (data obrashcheniya: 15.06.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Кокоев Мухамед Нургалиевич – доктор технических наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет, (360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), e-mail: kbagrostroy@yandex.ru.	*Kokoev Mukhamed Nurgalievich* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kabardino-Balkarian State University, (360004, Russia, Nalchik, Chernyshevsky St., 173), e-mail: kbagrostroy@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 15.10.2025; одобрена после рецензирования 28.10.2025, принята к публикации 10.11.2025.
The article was submitted 15.10.2025; approved after reviewing 28.10.2024; accepted for publication 10.11.2025.