

УДК 629.19:504.5

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-3-12-16

Научная статья

ВОЗМОЖНЫЙ СПОСОБ ЗАЩИТЫ ОПТИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ОТ МИКРОМЕТЕОРНОЙ ЭРОЗИИ

В.Т. Федоров¹, М.Н. Кокоев²¹ Концерн «Наноиндустрия»,² Кабардино-Балкарский
государственный университет
им. Х.М. Бербекова

В России имеется огромный потенциал для применения космических технологий в геологоразведке. Снимки из космоса служат ценным источником информации для геологических прогнозов. Как долго может служить оптика в космосе и обеспечивать качественные снимки, подвергаясь воздействию микрометеорного потока? В статье предложен новый способ защиты оптических приборов от микрометеорной эрозии. Способ базируется на применении самовосстанавливающейся поверхности тонкого слоя специальной жидкости, наносимой на защищаемую поверхность. Жидкость должна быть устойчива к солнечному и космическому излучениям. Реализация метода возможна благодаря совместному применению физики межфазных явлений и такого явления, как невесомость. Обсуждаются технические детали предложения.

Ключевые слова: геологоразведка, космос, оптика, микрометеорная эрозия, защитная жидкость, излучение, невесомость

В России имеется огромный потенциал для применения космических технологий в геологоразведке. Материалы космической съемки позволяют исследовать большие и труднодоступные территории, особенно в арктической зоне России. 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, построение карт, актуализация и анализ геологических аномалий и изменений, отслеживание состояния экзогенных геологических процессов. 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 [2].

© 2023, В.Т. Федоров, М.Н. Кокоев
Поступила в редакцию 14.04.2023

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

Original article

POSSIBLE WAY TO PROTECT SPACECRAFT OPTICS FROM MICROMETEOR EROSION

V.T. FEDOROV¹, M.N. KOKOEV²¹ CONCERN "NANOINDUSTRY",² KABARDINO-BALKAR STATE UNIVERSITY
NAMED AFTER H.M. BERBEKOV

There is a huge potential in Russia for the application of space technology in exploration, especially in the oil and gas sector. Images from space are a valuable source of information for geological predictions. How long can optics last in space and provide high-quality images when exposed to a micrometeor shower? The article proposes a new way to protect optical instruments from micrometeor erosion. The method is based on the use of a self-healing surface of a thin layer of a special liquid applied to the surface to be protected. Liquid resistant to solar and cosmic radiation. The implementation of the method is possible due to the physics of interfacial phenomena under microgravity conditions in space. The technical details of the proposal are being discussed.

KEYWORDS: geological exploration, space, optics, micrometeor erosion, protective liquid, radiation, microgravity

Наиболее известные космические системы для дистанционного зондирования Земли: Landsat 7, Landsat 8, Terra/Aster и WorldView-3 [5]. 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 США.

Как долго может служить линзовая оптика и обеспечивать качественные снимки, подвергаясь воздействию микрометеорного потока? Для начала разберемся с терминами. Что такое метеороид, метеор и метеорит? *Метеороид* – объект значительно меньше

2023/3

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 г. 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 [4].

В 2017 г. Международный астрономический союз решил, что объекты меньше 30 мкм классифицируются как микрометеороиды и межпланетная пыль [11]. Центр малых планет, это подразделение NASA, термин «метеороид» не использует [14]. 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 т космических тел – от песчинок до крупных камней [15].

Скорость соударения микрометеорного потока с космическим аппаратом (КА) от 10 до 72 км/с [13], 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, летящих со скоростью выше 10 км/с о стекло оптического прибора возникает давление более 15 ГПа (150 тыс. атмосфер) [16]. 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 ча-

стиц 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 все большее количество субмикронных высокоскоростных частиц искусственного происхождения, которые при столкновении с оптикой КА также повреждают ее поверхность [3].

Наиболее пагубно воздействие микрометеорных и техногенных частиц на объективы фотокамер, оптико-электронных приборов (ОЭП) астроориентации и навигации, иллюминаторов и солнечных батарей [3, 15]. 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.

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 при работе на высокой орбите, когда все 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. 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 хорошему смачиванию защищаемой поверхности (просветляющее покрытие входной линзы объектива) 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. Возможные конструкции для выпуска порции жидкости на защищаемую поверхность еще нужно разработать.

Энергия частицы расходуется на ее разрушение, на испарение материала частицы и защитной жидкости, а также на создание ударной волны в жидкости. Например, при массе каменно-железной метеорной частицы 1×10^{-10} г ее 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. иметь давление паров не выше 10^{-7} Па, что исключало бы заметную потерю массы за долгое время работы в условиях высокого вакуума;
2. хорошо смачивать защищаемую поверхность, краевой угол смачивания просветляющего покрытия объектива должен стремиться к нулю [1, 6];
3. быть лиофобной из выбранного конструкционного материала с целью создания барьера для ограничения растекания жидкости. Кроме тефлона (фторопласта) должны быть аналоги;
4. 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. 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. должна быть не токсичной и не горючей;

8. 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 [8, 9]. 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 [8, 10], что сравнимо с давлением в космосе на высоте 500 км – 9×10^{-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 ее 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.

Регенерация защитной жидкости заключается в очистке ее от микроскопических продуктов разрушения метеорных частиц, а также в удалении из нее 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.

О каком количестве жидкости идет речь для защиты от микрометеорной эрозии одного объектива? Плотность кремнийорганической жидкости марки ХС-2-1 1100 кг/м³. 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. Требуется изучения влияния 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 ее 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.

Выводы:

1. В России имеется большой потенциал для применения космических технологий в геологоразведке. Снимки из космоса служат ценным источником информации для геологических прогнозов. Материалы

космической съемки позволяют исследовать большие и труднодоступные территории, особенно в Восточной Сибири и арктической зоне России.

2. Продолжительное действие метеорных частиц приводит к помутнению оптических поверхностей приборов космического аппарата. Наиболее пагубно воздействие микрометеорных потоков и техногенных частиц на объективы фотокамер, оптико-электронных приборов, астроориентации и навигации, иллюминаторов и панелей солнечных батарей. Надо изучить вопрос: как долго может служить оптика в космосе и обеспечивать качественные снимки, подвергаясь длительному воздействию микрометеорного потока?

3. Предложен новый способ защиты оптических приборов от микрометеорной эрозии. Способ базируется на применении самовосстанавливающейся поверхности тонкого слоя специальной жидкости, наносимой на защищаемую поверхность. Жидкость должна быть устойчива к солнечному и космическому излучениям и другим физическим факторам открытого космоса. Реализация метода возможна благодаря совместному применению физики межфазных явлений и такого уникального явления, как невесомость. Решение обсуждаемого способа возможно после проведения длительных исследований поверхностных и межфазных свойств олигоорганосилоксанов и других подобных жидкостей в условиях, имитирующих факторы открытого космоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. АДАМСОН А.В. Физическая химия поверхности. М.: Мир, 1979. 568 с.
2. АКОВЕЦКИЙ В.Г. Космические мониторинговые наблюдения нефтегазопоявлений морских акваторий: геологические и геологические аспекты // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4(23). <https://russianspacesystems.ru/2021/07/29/kosmos-i-geologiya-perspektivnye-tekhn/> (дата обращения 27.10.2022).
3. БЕРЕГОВОЙ Г.Т., ЯРОПОЛОВ В.И., БАРАНЕЦКИЙ И.И. и др. Справочник по безопасности космических полетов. М.: Машиностроение, 1989. 336 с.
4. Как спасали "Салют". 2017. <https://topwar.ru/127699-ka-k-s-pa-sa-li-sa-lyut.html?ysclid=19wmb0ki9c268301135> (дата обращения 27.10.2022).
5. Космос и геология: перспективные технологии для геологоразведки. Мультиспектральное дистанционное зондирование территории. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/20/2430/htm> (дата обращения 27.10.2022).
6. Кремнийорганические жидкости. <https://www.chem21.info/info/1325672/?ysclid=lgdymp5e2198205490> (дата обращения 27.10.2022).

7. 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.
8. Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение / Под ред. М.В. Соболевского. М.: Химия, 1985. 248 с.
9. ПАУЭР Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. Москва. Энергия. 1969. 528 с.
10. УЭСТОН ДЖ. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1988. 325 с.
11. BEECH M., STEEL D. "On the Definition of the Term Meteoroid" // *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*. 1995. №36 (3). P. 281–284.
12. Interagency Group (Space) Working Group on Orbital Debris. "Report on Orbital Debris". NASA. NASA Technical Reports Server: 1. hdl:2060/19900003319. February 1989.
13. JENNISKENS P. Sierra Nevada fireball // SETI Institute. Retrieved. 2014. Vol. 11. №16.
14. RUBIN A.E., GROSSMAN J.N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions // *Meteoritics & Planetary Science*. 45 (1). P. 114–122.
15. UTREJA L.R. Space debris – Status, concerns and solutions. IAF, International Astronautical Congress 40th. Malaga. Spain. Oct. 7–13. 1989. IAF Paper 89–625. 7 p.
16. VOLLRATH K., THOMER G. *Kurzzeitphysik*. Springer-Verlag. Wein. New York. 1967. Т. 2. P. 352.
8. Oligoorganosiloxanes. Properties, obtaining, application. Ed. M.V. Sobolevsky. Moscow: Khimiya, 1985:248. (In Russian).
9. POWER B.D. High vacuum pumping devices. Moscow: Energiya. 1969:528. (In Russian).
10. WESTON J. High vacuum technique. Moscow.: Mir, 1988:325. (In Russian).
11. BEECH M., STEEL D. On the Definition of the Term Meteoroid. *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*. 1995. 36(3): 281–284.
12. Interagency Group (Space) Working Group on Orbital Debris. "Report on Orbital Debris". NASA. NASA Technical Reports Server: 1. hdl:2060/19900003319. February 1989.
13. JENNISKENS P. Sierra Nevada fireball. *SETI Institute. Retrieved*. 2014;11;(16).
14. RUBIN A.E., GROSSMAN J.N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science*. January 2010. 45(1):114–122.
15. UTREJA L.R. Space debris – Status, concerns and solutions. IAF, International Astronautical Congress 40th. Malaga. Spain. Oct. 7–13. 1989. IAF Paper 89–625. 7.
16. VOLLRATH K., THOMER G. *KURZZEITPHYSIK..* Springer-Verlag. Wein. new york. 1967;(2):352.

REFERENCES

1. ADAMSON A.V. Physical chemistry of the surface. Moscow: Mir, 1979:568. (In Russian).
2. AKOVETSKY V.G. Space monitoring observations of oil and gas manifestations of marine areas: geological and geological aspects. *Aktual'nyye problemy nefii i gaza*. 2018;4(23). <https://russianspacesystems.ru/2021/07/29/kosmos-i-geologiya-perspektivnyetechn/> (Accessed 27.10.2022). (In Russian).
3. BEREGOVY G.T., YAROLOV V.I., BARANETSKY I.I. ET AL. Handbook on the safety of space flights. М.: Mashinostroenie, 1989:336. (In Russian).
4. How the Salyut was saved. 2017. <https://topwar.ru/127699-kak-spasali-salyut.html?ysclid=19wmb0ki9c268301135> (accessed 10/27/2022). (In Russian).
5. Space and geology: promising technologies for exploration. Multispectral remote sensing of the territory. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/20/2430/html> (accessed 27.10.2022). (In Russian).
6. Silicone liquids. <https://www.chem21.info/info/1325672/?ysclid=lgdyymp5e2198205490> (accessed 10.27.2022). (In Russian).
7. MERZHLEVSKII L.A., TITOV V.N., FADEENKO YU.I., SHVETSOV G.A. High-speed throwing of solid bodies. *Fizika gorenija i vzryva*. 1987;23(5):77–91. (In Russian).

Федоров Виктор Тихонович,
д.т.н., советник директора Концерна «Наноиндустрия»

✉ 119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4, корп. 1,
119334, Moscow, st. Bardina, d. 4, building. 1
e-mail: fedorovsteer@gmail.com

Кокоев Мухамед Нурғалиевич,
д.т.н., профессор кафедры строительного производства
Кабардино-Балкарский госуниверситет им. Х.М. Бербекова,
советник РААСН

✉ 360004, КБР, Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
360004, KBR, Nalchik, st. Chernyshevsky, 173
e-mail: kbagrostroy@yandex.ru