

УДК 621.384.62; 629.7
EDN: AQQORI

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

Влияние околообъектовой среды на орбитальные космические аппараты

Л. М. Василяк, Е. В. Шубралова, В. Н. Чикирев

Выполнен анализ исследований свечения метеорных потоков, зарегистрированных в международных космических экспериментах «УФ-атмосфера» с 2019 г. и «Терминатор» на международной космической станции. Анализ показал, что количество зарегистрированных случаев свечения метеоров в УФ области спектра в атмосфере превышает расчетное зенитное часовое число событий, которые увидел бы наблюдатель на Земле. Это различие может быть связано с более точной регистрацией мелких частиц, слабое свечение которые не видно с поверхности Земли на фоне шумов. Обнаружены аэрозольные слоистые структуры в верхних слоях атмосферы при прохождении метеорами высот 90–100 км, как следствие непрерывного поступления микрочастиц из метеорных потоков в период эпохи. При ударе высокоскоростных частиц метеорных потоков о поверхность космического объекта возникают импульсная плазма, импульсные электрические и магнитные поля, импульсы электрического тока, которые воздействуют на космические аппараты и могут приводить к разрушающему воздействию на электронику и на компьютерные программы, что может приводить к отказу аппаратуры.

Ключевые слова: международная космическая станция; метеорные потоки; слоистые атмосферные структуры; высокоскоростные частицы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-5-10

Введение

Научные данные, полученные в космических экспериментах (КЭ) на международной космической станции (МКС), могут быть использованы для анализа циклов активности Солнца и галактического излучения; для

оценки динамики радиационной обстановки на трассе полета МКС; частоты воздействия высокоскоростных частиц регулярных метеорных потоков кометных хвостов на объект, что может привести не только к пробое гермоболочки, но и электрическим помехами, вызывающим отказ оборудования; исследования стойкости материалов космических аппаратов (КА) в условиях осадения на них химически активной среды; проблемы планетного карантина в связи с установленной жизнеспособностью микроорганизмов вне МКС. Анализ выполнен на основе данных, содержащихся в [1–14].

Регулярные метеорные потоки около МКС

Известны и изучены 36 регулярных метеорных потоков частиц кометных хвостов околоземного пространства. Характеристика метеорного потока «зенитное часовое число» –

Василяк Леонид Михайлович¹, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Шубралова Елена Владимировна², гл. специалист.

Чикирев Владимир Николаевич², гл. специалист.

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² АО Центральный научно-исследовательский институт машиностроения.

Россия, 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, 4.

Статья поступила в редакцию 23.09.2024

После доработки 6.11.2024

Принята к публикации 18.11.2024

Шифр научной специальности: 1.3.1

© Василяк Л. М., Шубралова Е. В., Чикирев В. Н., 2024

расчётная величина, характеризующая активность метеорного потока и показывающая, сколько метеоров в час смог бы увидеть наблюдатель, если бы его предельная видимая звёздная величина равнялась теоретической (6,5 m), при расположении радианта потока в зените (прямо над головой). Реально наблюдаемые индивидуальные значения ZHR обычно меньше. Согласно данным астрономических наблюдений зенитное часовое число варьируется от 3 до 50, однако у потоков Квадрантиды и Персеиды оно значительно больше и составляет 120 и 150 частиц в час.

Согласно расчетам Центра управления полетом, МКС находится в потоке метеоров от 60 % до 100 % эпохи их активности. Длительность пребывания МКС внутри потока зависит от угла между плоскостью ее орбиты и направлением потока, поэтому станция пребывает в различных состояниях по отношению к числу одновременно «бомбардирующих» ее метеорных потоков. Минимальное значение достигается, когда направление потока и плоскость орбиты МКС совпадают, и МКС защищена Землей. Максимальное значение достигается, когда орбита МКС перпендикулярна направлению потока [10]. МКС ежедневно совершает 16 витков вокруг Земли, и на каждом витке полета пересекает потоки метеоров. Расчеты показывают, что на интервале в один год возможны варианты, при которых МКС может находиться как в зоне безопасности каждого из 36 потоков, так и подвергается одновременному воздействию от одного до восьми потоков. Общее время нахождения в защищаемой Землей области для МКС составляет 25,4 % суммарного времени прогнозирования движения станции на один год.

Цель КЭ «УФ атмосфера» – регистрация импульсов свечения ночной атмосферы Земли в полосе длин волн ближнего УФ-излучения (300–400 нм) в широтах орбиты МКС. Свечение входящих в атмосферу метеоров регистрировалось широкоугольным телескопом, который был установлен на иллюминаторе в надирной зоне модуля «Звезда» МКС [1, 2, 3]. Так как регистрируются микрометеоры, попадающие в зону надир МКС (угол 44 градуса), то можно считать, что в это время МКС находится в зоне метеорного потока. Количество

зарегистрированных частиц, в потоке которых находилась МКС, может достигать и 250–350.

Ниже приводятся выборочные данные регистрации микрометеоров.

Поток «Квадрантиды»: 30.12.2019 – 170 частиц, 31.12.2019 – 160 частиц, 08.01.2020 – 75 частиц, 09.01.2020 – 50 частиц, 05.01.2021 – 75 частиц, 09.01.2021 – 120 частиц, 12.01.2021 – 120 частиц.

Поток «Персеиды»: 21.07.2020 – 340 частиц, 22.07.2020 – 345 частиц, 13.08.2020 – 210 частиц, 14.08.2020 – 160 частиц, 20.08.2020 – 340 частиц, 21.08.2020 – 380 частиц.

Поток «Урсиды»: 22.12.2020 – 310 частиц, 22.12.2023 – 55 частиц.

Поток «Дневные Ариетиды»: 25.05.2020 – 260 частиц, 26.05.2020 – 235 частиц, 15.06.2020 – 230 частиц, 16.06.2020 – 190 частиц.

Регистрация в надире свечения значительно большего числа частиц при «встрече» с атмосферой (верхней мезосферой и нижней термосферой), чем приводится в данных по зенитным часовым числам регулярных метеорных потоков, позволяет сделать вывод о наличии мельчайших частиц в потоке и установить параметр метеорных потоков – «плотность потоков». Это различие может быть связано с более точной регистрацией мелких частиц, слабое свечение которые не видно с поверхности Земли на фоне шумов. Результаты измерений показали динамичность околоземного пространства, присутствие непрерывно движущихся к Земле мельчайших частиц метеорных потоков, под воздействие которых могут попасть орбитальные объекты.

Слоистые атмосферные аэрозольные слои

В космических экспериментах «Терминатор» камерами в зоне лимба зарегистрированы аэрозольные слои на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы (90–100 км) в субтропиках и средних широтах обоих полушарий. Метеоры, входящие в атмосферу, разрушаются именно в этом диапазоне высот. Следовательно, зарегистрированные слоистые атмосферные структуры представляют собой аэрозольный слой метеорного происхождения, который постоянно присутствует в атмосфере Земли. Наблюдаемые стационарные слоистые

структуры находятся в динамическом равновесии, т. к. оседающие частицы, размер которых составляет несколько нанометров [4, 5], замещаются частицами, прибывшими из разрушенных частиц метеорных потоков. Это подтверждается регистрацией телескопом в экспериментах «УФ атмосфера» свечения непрерывно движущихся к Земле мельчайших частиц метеорных потоков. Эксперименты «Терминатор» добавляют индивидуальные характеристики потока, порождающего слоистые структуры. Локальные значения объемной концентрации метеорных аэрозольных частиц и спектр их размеров может меняться в зависимости от характеристик регулярных метеорных потоков, плотности атмосферы, наличия восходящих или нисходящих воздушных потоков, времени года и местоположения.

Опасность электромагнитного воздействия высокоскоростных микрочастиц на космический объект

При столкновении микрометеорита со скоростью несколько км/с с космическим аппаратом возникают электрические поля и токи, которые могут повредить микроэлектронике или вызвать сбой программ и сигналов управления и передачи информации. Даже относительно устойчивая силовая электроаппаратура может выйти из строя, если возникший высоковольтный короткий импульс вызовет слабый локальный электрический пробой или повреждение изоляции, а дальнейшие разрушения вызовет ток силовой электрической цепи, который будет проходить в месте локального пробоя. Основными механизмами создания электрических полей и токов в космическом аппарате по мере приближения к нему микрометеорита и затем удара являются следующие [13–16].

1. Микрочастица под воздействием УФ-излучения Солнца заряжается положительно вследствие фотоэффекта, т. е. эмиссии электронов при поглощении УФ-квантов. Заряд частицы может достигать около 1000 зарядов электрона на каждый микрон радиуса. При подлете заряженной микрочастицы на металлической поверхности начинают протекать

токи для создания электрического заряда отображения отрицательной полярности. При контакте частицы с поверхностью заряд частицы переходит в металл и далее происходит размывание этого пространственного заряда. При этих процессах в металле протекают токи проводимости, а на поверхности генерируются импульсные электрические поля.

2. При столкновении происходит сжатие среды, что вызывает появление электрического тока и сопутствующей ЭДС. Плотность возникающего тока может достигать 10–1000 мА/см². Наибольший эффект вызывает поляризационное взаимодействие [13]. Для создания таких плотностей тока в диэлектрике необходимы ЭДС величиной 10⁵–10⁶ В [13]. Эти токи возникают в объеме металла и диэлектрика и могут протекать и по противоположной стороне листа.

3. При столкновении происходит разогрев материала, и даже образуется импульсный плазменный факел, в результате чего при температурах более 1000 К начинается термоэлектронная эмиссия электронов. Вылетающие электроны создают электрическое поле, а на поверхности космического аппарата создается электрический заряд. Вылетающие электроны частично возвращаются на космический аппарат, в результате чего по поверхности протекают электрические токи.

Дальнейший разогрев приводит к созданию плотной плазмы, которая начинает расширяться в вакуум. Поскольку масса электронов на 4 порядка меньше массы ионов, то электроны со скоростями на два порядка большими, чем у ионов, улетают в пространство в вакуум. В результате объемного разделения зарядов улетевших электронов и оставшихся ионов возникает импульсное электрическое поле. Кроме электрического поля возникает также электромагнитное поле, для возникновения которого согласно законам электродинамики и теории поля необходимо движение заряженных частиц с ускорением. Возникающие электрические и электромагнитные поля в свою очередь индуцируют электрические токи проводимости в металлах и электрические токи смещения в диэлектриках. Если при ударе образуется сквозное отверстие, то электрические поля и токи будут возникать и внутри космического аппарата.

Возникающие электрические поля и токи через отверстия и щели проникают внутрь космического аппарата и могут вызвать различные повреждения и создавать электромагнитные помехи. Если удар микрочастицы произойдет на солнечных батареях или других электрических вводах, то вероятность прохода короткого микросекундного импульса тока и напряжения внутрь космического аппарата по выходящим электропроводам непосредственно к чувствительной аппаратуре становится большой.

Известны, по крайней мере, два космических аппарата, испытавших электрические аномалии, которые потенциально могли быть вызваны ударами метеороидов метеорного потока Персеид, включая спутник связи Olympus в августе 1993 года и спутник Landsat-5 в 2009 г. [14, 15, 16]. Наземные эксперименты показали, что в результате высокоскоростных ударов генерируется плазма. В результате исследования электрических эффектов установлено, что скорость метеорита является доминирующим фактором, при этом количество генерируемого заряда обычно масштабируется как масса, умноженная на скорость в четвертой степени [14, 15]. Образовавшееся при ударе облако плазмы вызвало ток, который вывел из строя систему контроля ориентации; космический корабль начал кувыряться. В результате к тому времени, когда ориентация была восстановлена, бортовое топливо было израсходовано, что привело к завершению миссии. Спутник дистанционного зондирования Landsat-5 был поражен метеороидами потока Персеиды 13 августа 2009 года. В результате временно вышел из строя гироскоп и космический корабль начал кувыряться. Нормальная работа восстановлена к 17 августа.

Chandra X-Ray Observatory обсерватории НАСА пострадал от спорадического ливня, близкого ко времени пика потока Леониды в ноябре 2003 года. Несоответствие устойчивости наведения указывало на удар, поскольку не было никаких признаков ложных срабатываний двигателя или указания на внутреннюю причину. Изменение импульса вызвало «колебание». Все системы продолжали нормально функционировать после события.

Научный спутник ЕКА XMM-Newton поражен 17 сентября 2001 года потоком эпсилон Персеид, в результате были потеряны 35 пикселей.

Следует отметить, что аномалии обоих космических аппаратов были не такими, которые обычно ожидают от ударов метеороидов, т. е. не было физического повреждения или смещения ориентации из-за передачи импульса. Быстрые метеороиды потока Персеиды (59 км/с) могут при ударе образовать импульсную плазму, которая затем может являться источником электромагнитных импульсов и импульсных электрических токов.

В экспедиции к комете Галлея в 1986 г. из-за воздействия частиц хвоста кометы Галлея (скорость 78 км/с) мощность солнечных батарей упала почти на 45 % у российских аппаратов «Вега-1» и Вега-2», а у западноевропейского аппарата Джотто вышла из строя телекамера, а сама станция потеряла ориентацию [6].

13 августа 2023 г. на аппарате «Луна-25» прибор для регистрации микрочастиц, левитирующих у поверхности Луны, на траектории перелета к Луне зарегистрировал удар микрометеорита (поток «Персеиды», 59 км/с). Возникшие при ударе импульсы электрического тока, могли привести к сбою программ и передачи информации на отключение тормозного двигателя для мягкой посадки.

Вероятность механического и электромагнитного воздействия высокоскоростных частиц на поверхность орбитального объекта определяет требования к выбору материалов конструкции космических объектов, изоляции электрических вводов и научной аппаратуры от возможного возникновения импульсного электрического тока и потенциала.

Вклад Земли в околообъектовую среду

Кроме динамичных слоистых образований метеорного происхождения экзосфера Земли включает непрерывно движущиеся от Земли аэрозоли. Анализ мелкодисперсного осадка с поверхности МКС (КЭ «Тест») позволил установить наличие следов вулканических газов. Маркером следов вулканических газов, достигших внешней поверхности МКС, явилось обнаружение редкого металла рения. С версией вулканического происхождения рения согласуется обнаружение составляющих вулканических газов фумарольных полей уникального месторождения рения на вулкане

Кудрявый о. Итуруп: серы, фтора, хлора, в том числе, радиоактивных изотопов калия, цезия, урана [7, 8, 9]. Частицы газопылевых выбросов вулкана могут попадать в верхнюю часть ионосферы на высоте орбиты МКС с восходящей ветвью глобальной электрической цепи. Этот своеобразный ионосферный вертикальный конвейер обеспечивает медленный подъём аэрозолей в области конденсатора «Земля-ионосфера» за счёт механизма турбулентной электротермической диффузии, сопровождающегося массопереносом дисперсного вещества. Орбитальные аппараты, также как орбитальный космический мусор, могут являться сборщиками и носителями на своей поверхности биообъектов, агрессивных химических элементов и радиоактивных частиц, не рассеиваемых в космическое пространство, а адсорбируемых их поверхностью [11, 12].

Динамическое равновесие движущихся частиц на Землю и с Земли, определило новые опасные (пока не учитываемые) аспекты экзосферы Земли и околообъектового пространства, как для орбитальных средств, так и для Земли. Это связано с накоплением космической пыли и тропосферного аэрозоля на поверхности орбитальных средств и опасности доставки их на Землю при завершении полета.

Заключение

Метеорное вещество является важным фактором космического пространства, влияющим на живучесть орбитальных космических аппаратов. Результаты расчетов и анализа измерений показали динамичность околоземного пространства, присутствие в нем непрерывно движущихся к Земле мельчайших частиц метеорных потоков, под воздействием которых могут попасть орбитальные объекты. Неизбежное воздействие высокоскоростных частиц на объект может привести не только к пробое гермоболочки, но и к импульсам электрического поля и тока, вызывающим отказы жизненно важных систем и оборудования. Анализы осадка на поверхности МКС показали присутствие биологических и минеральных загрязнений с Земли в результате их выноса глобальной электрической цепью. Опасность для конструкции и экипажа орбитальных систем, а также возвращаемых аппаратов, связана с постоянным

накоплением на их внешней поверхности химически опасных элементов, космической пыли и тропосферного аэрозоля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klimov P. A. / Bulletin Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. № 4. P. 389.
2. Casolino M., Barghini D., Battisti M. et al. / Remote Sensing of Environment. 2023. Vol. 284. P. 113336.
3. Bacholle S., Barrillon P., Battisti M. et al. / Astrophysical Journal, Supplement Series. 2021. Vol. 253. № 2. P. 36.
4. Беляев А. Н., Николайшвили С. Ш., Омельченко А. Н., Ретин А. Ю., Полуаршинов М. А., Смирнов Ю. В., Страхов А. В., Батищев А. Г., Стасевич В. И., Платов Ю. В. / Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. № 4. С. 455–466.
5. Беляев А. Н. / Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 344–351.
6. Аванесов Г. А., Мороз В. И. Наука и человечество. – М.: Знание, 1988. С. 214–231.
7. Пономарев Г. П., Павлюков В. К., Абдурахманов А. И., Рыбин А. В., Бородин О. С. / Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2008 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2008.
8. Пономарев Г. П., Рашидов В. А., Чубурков Ю. Т. и др. / Материалы Всероссийского совещания «Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Северной Пацифики». – Магадан, 2003. Т. 2. С. 200–201.
9. Марченко А. Г., Вольфсон А. А., Морозов М. В., Хрол Н. С., Штейнберг Г. С., Штейнберг М. Г. / Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 2. С. 134–150.
10. Deshevaya E. A., Shubralova E. V., Fialkina S. V., Guridov A. A., Novikova N. D., Tsygankov O. S., Lianko P. S., Orlov O. I., Morzunov S. P., Rizvanov A. A., Nikolaeva I. V. / BioNanoScience. 2020. Vol. 10. P. 81–88. doi: 10.1007/s12668-019-00712-1
11. Zinicovscaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shubralova E., Tsygankov O. / Acta Astronautica. 2021. Vol. 189. P. 278–282.
12. Цыганков О. С. / Полет. 2023. № 1-2. С. 16–24.
13. Воронов К. Е., Телегин А. М., Пияков А. В., Рязанов Д. М. / Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 3–20.
14. Cooke W. J. The 2009 Perseid Meteoroid Environment and Landsat 5. NASA MEO Internal Report. – Ala.: NASA Marshall Space Flight Center in Huntsville, 2009.
15. McDonnell J., McBride N., Green S. Near Earth environment, in Interplanetary Dust / Eds. Grun E., Gustafson B. A. S., Dermontt S. F. – New York, N.Y.: Springer, 2001. P. 161–231.
16. Kelley M. C., Pancoast S., Close S., Wang Zh. / Advances in Space Research. 2012. Vol. 49. № 6. P. 1029.

Influence of the around-object environment on orbital space vehicles

L. M. Vasilyak¹, E. V. Shubralova² and V. N. Chikirev²

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences

Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

² Joint Stock Company "Central Research Institute for Machine Building"

4 Pionerskaya st., Korolev, Moscow Region, 141070, Russia

Received 23.09.2024; revised 6.11.2024; accepted 18.11.2024

The analysis of studies of the luminescence of meteor shower particles recorded in the international space experiments "UV-atmosphere" since 2019 and "Terminator" on the international space station has been performed. The analysis showed that the number of recorded cases of meteor luminescence in the UV region of the spectrum in the atmosphere exceeds the estimated zenith hourly number of events that an observer on Earth would have seen. This difference may be due to the more accurate registration of small particles, the faint glow of which is not visible from the surface of the Earth against the background of noise. Aerosol layered structures were found in the upper layers of the atmosphere during the passage of meteors at altitudes of 90–100 km, as a result of the continuous influx of microparticles from meteor showers during the epoch. When high-speed particles of meteor showers strike the surface of a space object, pulsed plasma, pulsed electric and magnetic fields, and electric current pulses occur, which affect spacecraft and can lead to destructive effects on electronics and computer programs, which can lead to equipment failure.

Keywords: international space station; meteor showers; layered atmospheric structures; high-speed particles.

REFERENCES

1. Klimov P. A., Bulletin Russian Academy of Sciences: Physics **85** (4), 389 (2021).
2. Casolino M., Barghini D., Battisti M. et al., Remote Sensing of Environment **284**, 113336 (2023).
3. Bacholle S., Barrillon P., Battisti M. et al., Astrophysical Journal, Supplement Series **253** (2), 36 (2021).
4. Belyaev A. N., Nikolaishvili S. S., Omel'chenko A. N., Repin A. Yu., Poluarshinov M. A., Smirnov Yu. V., Strakhov A. V., Batishchev A. G., Stasevich V. I. and Platov Yu. V., Geomagnetism and Aeronomy **63**, 409–420 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0016793223600248>
5. Belyaev A. N., Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics **58** (3), 344–351 (2022) [in Russian].
6. Avanesov G. A. and Moroz V. I., Science and humanity, Moscow, Znanie, 1988.
7. Ponomarev G. P., Pavlyukov V. K., Abdurakhmanov A. I., Rybin A. V. and Borodina O. S. Materials of the conference dedicated to the Day of volcanologist. Petropavlovsk-Kamchatsky, March 27–29, 2008. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2008 [in Russian].
8. Ponomarev G. P., Rashidov V. A., Chuburkov Yu. T. et al. Materials of the All-Russian meeting "Geodynamics, magmatism and minerageny of the continental margins of the Northern Pacific". Magadan, **2**, 200–201 (2003) [in Russian].
9. Marchenko A. G., Volfson A. A., Morozov M. V. et al., Geology of Ore Deposits **62**, 122–137 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1075701520020038>
10. Deshevaya E. A., Shubralova E. V., Fialkina S. V., Guridov A. A., Novikova N. D., Tsygankov O. S., Lianko P. S., Orlov O. I., Morzunov S. P., Rizvanov A. A. and Nikolaeva I. V., BioNanoScience **10**, 81–88 (2020). doi: 10.1007/s12668-019-00712-1
11. Zinivovskaia I., Grozdov D., Yushin N., Safonov A., Proshin I., Volkov M., Pryadka A., Belyaev V., Shubralova E. and Tsygankov O., Acta Astronautica **189**, 278–282 (2021).
12. Tsygankov O. S., Polyot, № 1-2, 16–24 (2023) [in Russian].
13. Voronov K. E., Telegin A. M., Piyakov A. V. and Ryazanov D. M., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **8** (1), 3–20 (2020) [in Russian].
14. Cooke W. J. The 2009 Perseid Meteoroid Environment and Landsat 5. NASA MEO Internal Report, NASA Marshall Space Flight Center in Huntsville, Ala., 2009.
15. McDonnell J., McBride N. and Green S. Near Earth environment, in Interplanetary Dust / Eds. Grun E., Gustafson B. A. S., Dermontt S. F., Springer, New York, N.Y., 2001, pp. 161–231.
16. Kelley M. C., Pancoast S., Close S. and Wang Zh., Advances in Space Research **49** (6), 1029 (2012).