

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

SPACE DEBRIS EFFECT ON SOLAR RADIATION PROPAGATION

С.С. Вениаминов

Научно-исследовательский испытательный центр
ЦНИИ ВКС МО РФ,
Москва, Россия, sveniami@gmail.com

S.S. Veniaminov

Central Research Institute of Aerospace Forces,
Ministry of Defense of the Russian Federation,
Moscow, Russia, sveniami@gmail.com

С.И. Козлов

Научно-исследовательский испытательный центр
ЦНИИ ВКС МО РФ,
Москва, Россия, s_kozlov@inbox.ru
Институт динамики геосфер
имени академика М.А. Садовского РАН,
Москва, Россия

S.I. Kozlov

Central Research Institute of Aerospace Forces,
Ministry of Defense of the Russian Federation,
Moscow, Russia, s_kozlov@inbox.ru
Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,
Moscow, Russia

М.Ю. Кузьмичева 

Институт динамики геосфер
имени академика М.А. Садовского РАН,
Москва, Россия, mukuzm@gmail.com

M.Yu. Kuzmicheva

Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS,
Moscow, Russia, mukuzm@gmail.com

Аннотация. Рост количества космического мусора (КМ) в околоземном пространстве уже представляет угрозу для деятельности в космосе, создает помехи астрономическим наблюдениям и может привести к негативным экологическим последствиям на Земле в будущем. В работе получена оценка ослабления солнечного излучения в настоящее время в зависимости от длины волны в диапазоне длин волн от вакуумного ультрафиолета до инфракрасного. Определена скорость экспоненциального увеличения массы мелкого КМ, актуальная в настоящее время. Получены также оценки массы КМ в ближайшем будущем, при которых логарифм ослабления солнечного излучения возрастет до 10^{-6} – 10^{-3} . По скорости нарастания массы определено время, за которое логарифм ослабления солнечного излучения увеличится до 10^{-6} .

Ключевые слова: космический мусор, солнечное излучение, экологическая безопасность.

Abstract. The growing amount of space debris (SD) in near-Earth space already poses a threat to space activities, interferes with astronomical observations, and may lead to negative environmental consequences on Earth in the future. This paper estimates the current attenuation of solar radiation in the wavelength range from vacuum ultraviolet to infrared. We determine the rate of exponential increase in SD mass. Estimates of the future SD mass are also obtained at which the logarithm of solar radiation attenuation will increase to 10^{-6} – 10^{-3} . We find the time required for the logarithm of solar radiation attenuation to increase to 10^{-6} .

Keywords: space debris, solar radiation, environmental safety.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время становится все более очевидным, что неуправляемый непрерывный рост космического мусора (КМ), особенно мелкого, в околоземном пространстве представляет реальную угрозу для человеческой деятельности в космосе [Вениаминов, 2023; Адушкин и др., 2019]. Во-первых, возрастает вероятность столкновения с КМ действующих космических аппаратов (КА) различного назначения, находящихся на разных орбитах. Во-вторых, астрономы-наблюдатели отмечают, что уже сейчас в ряде случаев КМ влияет на их наблюдения в оптическом диапазоне спектра. И, наконец, в-третьих,

в [Адушкин и др., 2019] отмечается, что с течением времени засоренность околоземного космического пространства может повлиять на распространение солнечного излучения, а это приведет к весьма негативным экологическим последствиям на Земле.

Цель данной статьи — оценка критической массы КМ, с которой начнется заметное влияние на излучение от Солнца.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

Для моделирования параметров использовались данные о значениях потоков мелкого КМ на поверх-

ности КА, а также их распределения по размерам. Данные о потоках частиц взяты из работ [Адушкин и др., 2019; Manis et al., 2021].

Были использованы величины потоков КМ на разных орбитах: на высотах 800–900, 400–450 (орбита Международной космической станции, МКС), 560–620 км (орбита телескопа «Хаббл»). В работах приведены потоки для КМ разного размера. Минимальные размеры фрагментов, для которых существуют экспериментальные данные, составляет 2000 мкм (2 мм) на высотах до 1000 км (по наблюдениям радаров Голдстоун и Хусир) и 100 мкм (0.1 мм) для измерений по количеству ударов о поверхность КА.

На рис. 1 показано количество известных каталогизированных крупных (≥ 10 см) космических объектов (КО) в 10-километровых зонах на разных высотах на низких орбитах для разных временных эпох [Вениаминов, 2023].

Различные объекты в космосе порождают КМ, хотя не все они относятся к нему. С годами засоренность возрастает [Адушкин и др., 2019; Derelict ..., 2023; Three ..., 2024].

На рис. 2 показаны зависимости потока F КМ от диаметра частиц D на высотах 560–620 км. Сплошные кривые соответствуют распределениям, полученным по моделям ORDEM-3.1 (кривая 1) и MASTER-8 (кривая 2) [Manis et al., 2021], штриховые — аппроксимации этих распределений степенными функциями типа

$$F(d < D) = AD^{-b}, \quad (1)$$

где A и b — постоянные; d — наименьший диаметр. При этом для рассматриваемых двух распределений было найдено

$$A_1 = 3504998.47, \quad b_1 = 2.354611, \quad (2)$$

$$A_2 = 60420.74, \quad b_2 = 1.610146. \quad (3)$$

Согласование модельных распределений с данными измерений проводилось только в диапазоне размеров частиц 100–300 мкм [Manis et al., 2021], в котором (см. рис. 2) оба распределения весьма близки. При переходе к более мелким размерам нужно учитывать, что функция распределения точно не известна, поэтому в расчете мы рассматривали оба распределения (2) и (3).

Спектральный диапазон солнечного излучения, рассматриваемый в статье, выбран от 0.1 до 100 мкм. В этот диапазон попадает область вакуумного ультрафиолета, содержащая линии Ly α , Ly β , определяющие ионизацию нижней и средней ионосферы, части областей видимого излучения, а также ближнего и дальнего инфракрасного излучения, играющего важную роль в тепловом балансе Земли.

Рассматривались только фрагменты КМ, находящиеся на круговых орбитах. Предполагалось, что они равномерно распределены вдоль траектории КА, по ударам о поверхность которого определялся поток вещества, а концентрации частиц предполагались одинаковыми в некотором диапазоне высот $\Delta h \sim 50$ км около орбиты данного КА.

Допускалось также, что на разных высотах распределения КМ по размерам имеют один и тот же показа-

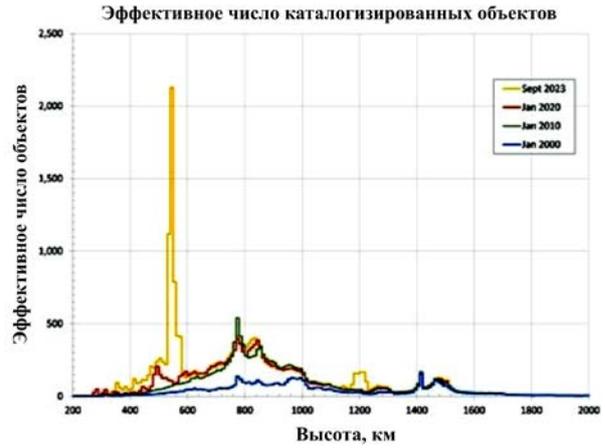


Рис. 1. Количество КО в 10-километровых зонах на различных высотах на низких орбитах

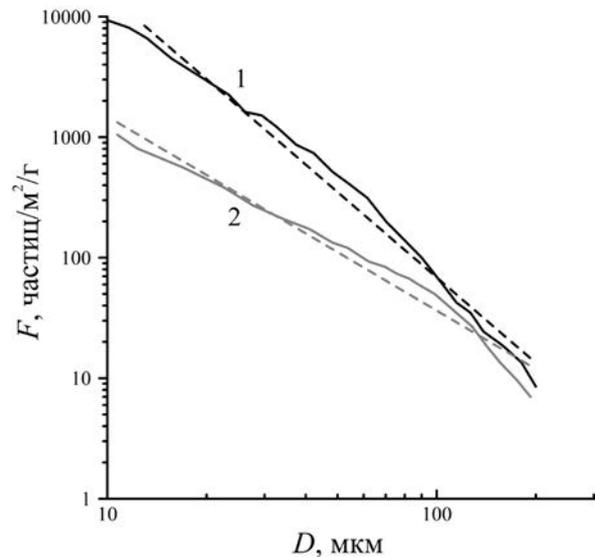


Рис. 2. Модельные потоки КМ в зависимости от размера

частицы b , но значения коэффициента A разные. Они даны в табл. 1 (для b из (2)). На рис. 2 определены коэффициенты A для высоты 560 км (орбита телескопа «Хаббл»). На высотах 400 км (орбита МКС) и 800 км (солнечно-синхронная орбита) они получены по аналогичным модельным зависимостям из [Manis et al., 2021]. Для высоты 1200 км использовалось распределение массы КО по высоте (см. [Адушкин и др., 2019], рис. 4). Поток КМ, соответствующий высоте 800 км, масштабировался по соотношению масс и длин орбит для высот 1200 и 800 км для потока на высоте 1200 км.

Чтобы перейти от величин потоков частиц в год к их концентрациям в единице объема, мы рассчитывали длину пути, которую проходит детектор частиц КМ на орбите за год. Для определения концент-

Таблица 1

Зависимость коэффициентов A от высоты

Высота, км	Коэффициент A
1200	$2.22 \cdot 10^6$
800	$4.10 \cdot 10^7$
560	$3.58 \cdot 10^6$
400	$4.10 \cdot 10^5$

раций на высотах ниже 400 км использовалось распределение масс КО по высотам из [Адушкин и др., 2019] и значение концентрации на 400 км, для высот больше 1200 км использовалось это же распределение масс и значение концентрации на 800 км.

Концентрации КМ на промежуточных орбитах определялись с помощью логарифмической интерполяции. Рассматривался диапазон высот 200–1800 км.

Хотя форма фрагментов КМ в подавляющем большинстве случаев не является сферической (см. распределение по форме в [Greene, 2024; Cowardin et al., 2024]), для расчета сечения экстинкции s_{ext} , зависящего от диаметра D и длины волны излучения λ , применялось приближение Ми [Тимофеев, Васильев, 2003]. Входными параметрами для программы расчета, помимо D и λ , были действительная и мнимая части показателя преломления n вещества КМ. Предполагалось, что фрагменты КМ состояли из алюминия [Bernhardt et al., 1993], поскольку известно, что в составе КМ преобладают металлы: Al, Fe, немного Cu и Ti [Cowardin et al., 2024]. Используемый в расчетах показатель преломления алюминия был получен в результате измерений на $\lambda=0.589$ мкм [Гуревич, 1983]. Данные для других длин волн отсутствуют, поэтому на этом этапе моделирования дисперсия показателя преломления не учитывалась.

Коэффициент ослабления частицами Al $\alpha_{Al}(h, \lambda)$ определялся по уравнению

$$\alpha_{Al}(h, \lambda) = \sum s_{ext}(D_k, \lambda) N(D_k). \quad (4)$$

Здесь $N(D_k)$ — концентрация КМ с диаметрами $D_k - D_{k+1}$ на высоте h . Суммирование проводилось по диапазону размеров КМ.

При расчете ослабления излучения учитывалось однократное рассеяние из-за очевидной разреженности КМ. Считалось, что излучение в атмосфере распространялось вертикально.

Дифференциальное уравнение переноса излучения вдоль луча при отсутствии излучения самой среды записывается следующим образом:

$$dI(\lambda)/dh = -\alpha(\lambda)I(\lambda). \quad (5)$$

где I — интенсивность излучения, h — координата вдоль луча, α — объемный коэффициент ослабления (индексы длины волны опущены). В атмосфере для сложения газовых и аэрозольных характеристик справедливо

$$\alpha = \alpha_{mol} + \alpha_a, \quad (6)$$

где α_{mol} — вклад в ослабление газовых компонент; α_a — вклад аэрозолей [Тимофеев, Васильев, 2003]. В нашей модели

$$\alpha = \alpha_{atm} + \alpha_{Al}, \quad (7)$$

где α_{atm} и α_{Al} — коэффициенты ослабления атмосферой и фрагментами КМ. С учетом зависимости $\alpha(h)$ решение (5) запишется в виде

$$I(h) = I_0 \exp\left(-\int_0^h \alpha(h') dh'\right). \quad (8)$$

Здесь I_0 — начальное значение интенсивности (при $h=0$). Величина $P=I(h)/I_0$ — функция пропускания слоя атмосферы толщиной h [Тимофеев, Васильев, 2003]. Можно представить P следующим образом (7):

$$P = \exp\left(-\int_0^h \alpha(h') dh'\right) = \exp\left(-\int_0^h \alpha_{atm}(h') dh'\right) \exp\left(-\int_0^h \alpha_{Al}(h') dh'\right). \quad (9)$$

Мы не учитываем поглощение атмосферой ($\alpha_{atm}=0$). В этом случае функция пропускания $P(\lambda)$ определяется уравнением

$$P(\lambda) = \exp\left(-\int_{h_1}^{h_2} \alpha_{Al}(h, \lambda) dh\right). \quad (10)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 показаны функции пропускания в зависимости от длины волны (кривые 1 и 2) для распределений КМ по размерам с показателями степени b_1 и b_2 (2), (3).

По результатам моделирования видно, что распределения КМ по размерам имеют существенное значение для получения критической оценки влияния КМ на солнечное излучение.

Ослабление излучения максимально для варианта распределения (2) в видимом диапазоне и составляет $\sim 5 \cdot 10^{-8}$. Полученное ослабление потока солнечного излучения имеет пренебрежимо малое значение и не является существенным фактором, который бы оказывал влияние на деятельность человека в настоящее время. Чтобы ослабление достигло величины, например, 10^{-6} , количество фрагментов должно возрасти в 20 раз. Накопление такой массы мелких фрагментов КМ может произойти примерно за 50 лет при скорости роста массы, наблюдаемой сейчас. Скорость увеличения массы оценивалась по данным работы [Адушкин и др., 2019]. Значение 10^{-6} для логарифма ослабления излучения выбрано таким образом, чтобы промежуток времени, за который экспоненциально увеличится масса КМ, был не более нескольких десятков лет. Оценка нарастания массы со временем сделана со значением скорости нараста-

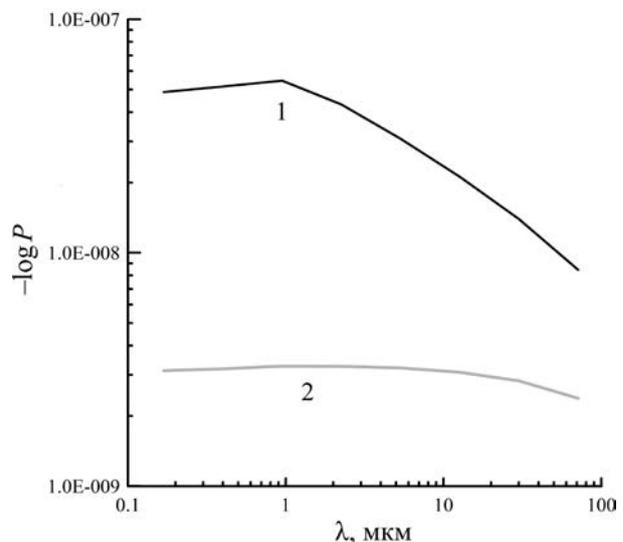


Рис. 3. Функции пропускания в зависимости от длины волны для двух распределений (2), (3)

ния массы, актуальной на 2015 г. (определена по данным, представленным на рис. 2 в [Адушкин и др., 2019]). Группировка КА на низких орбитах быстро увеличивается за 5–7 лет. Следует ожидать, что и скорость нарастания массы КМ будет увеличиваться.

Также были выполнены расчеты массы M столба КМ на настоящий момент времени для двух вышеупомянутых вариантов распределений по размерам. Результаты представлены в табл. 2. В табл. 3 показаны массы столба КМ при условии возрастания ослабления излучения.

Таблица 2

Массы ослабляющего столба КМ для вариантов распределений по размерам (2) и (3)

Масса M , кг/м ² :	$2.88 \cdot 10^{-10}$	$8.16 \cdot 10^{-11}$
Вариант:	1	2
Максимальное ослабление солнечного излучения $-\log(P)$	$5.46 \cdot 10^{-8}$	$3.27 \cdot 10^{-9}$

Таблица 3

Массы ослабляющего столба КМ для вариантов распределений по размерам (2) и (3) при ослаблении $1.0 \cdot 10^{-6}$ и $1.0 \cdot 10^{-3}$

Максимальное ослабление солнечного излучения $1.0 \cdot 10^{-6}$	Масса, кг/м ² , вариант 1: $5.28 \cdot 10^{-9}$	Масса, кг/м ² , вариант 2: $2.50 \cdot 10^{-8}$
Максимальное ослабление солнечного излучения $1.0 \cdot 10^{-3}$	Масса, кг/м ² , вариант 1: $5.28 \cdot 10^{-6}$	Масса, кг/м ² , вариант 2: $2.50 \cdot 10^{-5}$

ВЫВОДЫ

Полученная в работе на основании описанной модели оценка критической засоренности КМ показывает, что при экспоненциальном увеличении его количества он может представлять потенциальную экологическую угрозу для окружающей среды. По оценкам скорости накопления массы мелкого КМ в настоящее время, увеличение логарифма ослабления солнечного излучения за счет КМ до значения 10^{-6} может произойти примерно через 50 лет. В настоящее время и в ближайшем будущем ослабление солнечного излучения за счет КМ не является существенным фактором, который бы оказывал влияние на деятельность человека.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200624-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Козлов С.И. Об оценке опасности мелкого космического мусора для космической деятельности и экологии. *Воздушно-космическая сфера*. 2019, № 3, с. 72–81. DOI: [10.30981/2587-7992-2019-100-3-72-81](https://doi.org/10.30981/2587-7992-2019-100-3-72-81).
- Вениаминов С.С. *Космический мусор. Техногенное засорение космоса и его последствия*. М.: Изд. ИКИ РАН. Изд. 3, 2023, 204 с. DOI: [10.21046/spacedebris-2023](https://doi.org/10.21046/spacedebris-2023).
- Гуревич М.М. *Фотометрия*. Л.: Энергоатомиздат, 1983, 272 с.
- Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. *Теоретические основы атмосферной оптики*. СПб.: Наука, 2003, 474 с.
- Bernhard R., Barrett R.A., Zolensky M.E. Analytical electron microscopy of LDEF impactor residues. *“LDEF 69 Months in Space” 3rd Postretrieval Symposium*. Williamsburg, VA (United States). 1993, pt. 1, pp. 401–427.
- Cowardin H., Opiela J., Liou J.-C., et al. DebrisSat: 10 Years and Growing. *ODQN*. 2024, vol. 28, iss. 4, pp. 5–8.
- Derelict cosmos communications spacecraft breaks up in June 2023. *ODQN*. 2023, vol. 27, no. 4, pp. 1–2.
- Greene R. Aerodynamic demise model for carbon fiber reinforced polymer. *ODQN*. 2024, vol. 28, no. 4, pp. 3–5.
- Manis A., Matney M., Vavrin A., et al. Comparison of the NASA ORDEM 3.1 and ESA MASTER-8 models. *ODQN*. 2021, vol. 25, no. 3, pp. 2–4.
- Three new on-orbit fragmentations. *ODQN*. 2024, vol. 28, no. 4, pp. 1–2.

Как цитировать эту статью:

Вениаминов С.С., Козлов С.И., Кузьмичева М.Ю. Влияние космического мусора на распространение солнечного излучения. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 21–24. <https://doi.org/10.12737/szf-121202603>.