

Vitaly V. ADUSHKIN,*Academician of the RAS, Chief Researcher, Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow, Russia, adushkin@idg.chph.ras.ru***Виталий Васильевич АДУШКИН,***академик РАН, главный научный сотрудник Института динамики геосфер РАН, Москва, Россия, adushkin@idg.chph.ras.ru***Oleg Y. AKSENOV,***Dr. Sci. (Tech), Professor, Head of the Research-Test Center, the Central Research Institute of the Aerospace Defence Forces of the RF Ministry of Defence, Moscow, Russia, aks974@yandex.ru***Олег Юрьевич АКСЁНОВ,***доктор технических наук, профессор, начальник Научно-исследовательского испытательного центра Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны Минобороны России, Москва, Россия, aks974@yandex.ru***Stanislav S. VENIAMINOV,***Dr. Sci. (Tech), Professor, Senior Researcher of the Research-Test Center, the Central Research Institute of the Aerospace Defence Forces of the RF Ministry of Defence, Moscow, Russia, sveniami@gmail.com***Станислав Сергеевич ВЕНИАМИНОВ,***доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного центра Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны Минобороны России, Москва, Россия, sveniami@gmail.com***Stanislav I. KOZLOV,***Dr. Sci. (Tech), Senior Researcher, Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow, Russia, skozlov@inbox.ru***Станислав Иванович КОЗЛОВ,***доктор технических наук, старший научный сотрудник Института динамики геосфер РАН, Москва, Россия, skozlov@inbox.ru*

ABSTRACT | In contrast to large orbital debris, the impact of small one on space activities and ecology of the Earth and near-Earth space is often underestimated. As shown in this paper, it is unfair. According to the data from different sources, the amount, mass, and dynamics of the small orbital debris population in LEO, its danger to space activity are estimated as well as the consequences of multi-satellite communication space systems deployment being planned now. The latter makes the study of this area particularly relevant. Various aspects of the consequences of technogenic contamination of near-Earth space are considered, as well as the danger of small space debris to space activities and the ecology of the Earth and near-Earth space in comparison to the danger of large debris. The significant lack of complete and reliable information on small space debris due to the shortage of sensors that can observe it is marked.

Keywords: *near-Earth space, space activities, space object, orbital debris, collisions in space, hazard, Kessler syndrome, ecology, contamination mitigation measures.*

АННОТАЦИЯ | В отличие от влияния крупного космического мусора влияние мелкого на космическую деятельность и экологию Земли и околоземного пространства часто недооценивают. В статье показано, что это несправедливо. По данным из различных источников оцениваются количество, масса и динамика популяции мелкого космического мусора в низкоорбитальной области и его опасность для космической деятельности, а также последствия (с точки зрения прогрессирующего засорения космоса) реализации планов развертывания в низкоорбитальной области многоаппаратных коммуникационных космических систем. Последнее придает исследованию этой области особенную актуальность. Рассматриваются различные аспекты последствий техногенного засорения околоземного космоса, особенности опасности со стороны мелкого космического мусора для космической деятельности и экологии Земли и околоземного пространства в сравнении с опасностью со стороны крупного мусора. Отмечается существенный недостаток полных и надежных сведений о мелком космическом мусоре из-за дефицита средств, способных его наблюдать.

Ключевые слова: *околоземное космическое пространство, космическая деятельность, космический объект, космический мусор, столкновения в космосе, опасность, синдром Кesslera, экология, меры противодействия засорению*

An astronaut in a white spacesuit is shown from the chest up, holding a model of the Earth with both hands. The astronaut's helmet is reflective, showing a bright light source. The background is a deep space scene with a starry sky and a faint nebula. The text is overlaid on the left side of the image.

ON THE ESTIMATE OF THE SMALL SPACE DEBRIS DANGER FOR SPACE ACTIVITIES AND NEAR-EARTH ECOLOGY

ОБ ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ МЕЛКОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ЭКОЛОГИИ ЗЕМЛИ

ВВЕДЕНИЕ

С началом эры освоения космоса в экологии Земли и околоземного космического пространства (ОКП) произошло принципиально новое и драматическое событие: в этом пространстве деятельности человека появилась и стала стремительно наращиваться популяция техногенных космических объектов, в которой все большую долю составляет так называемый космический мусор (КМ) [1].

Строго говоря, и до 1957 года ОКП не было пустым. Порядка 40 000 ($\pm 20\ 000$) тонн метеороидов входит в атмосферу Земли ежегодно. Но метеороиды, астероиды и другие космические тела, вращающиеся по орбитам вокруг Солнца, иногда попадают в ОКП, быстро и однократно (что принципиально!) его пронизывают и либо покидают его, либо сгорают в атмосфере. Конечно, теоретически можно рассчитать, под каким углом и, главное, с какой скоростью астероид должен войти в ОКП, чтобы он был захвачен гравитационным полем Земли и вышел на орбиту вокруг нее, оставаясь там надолго. Однако вероятность этого события мизерная. Важно то, что естественные тела не накапливаются в ОКП. И лишь некоторые из них и очень редко достигают поверхности Земли. Поверхность Земли «коллекционировала» метеориты миллиарды лет.

В отличие от естественных, техногенные (искусственные) космические объекты (КО) (появившиеся всего лишь несколько десятков лет назад), будучи выведены на орбиты вокруг Земли, обычно надолго остаются в ОКП, а по завершении своей функциональной миссии (если они были действующими космическими аппаратами (КА)) остаются постоянной угрозой столкновения с другими КО, в том числе и с действующими КА. К примеру, если на Земле в вас стреляли и промахнулись, то через секунду пуля во что-нибудь войдет и перестанет быть опасной как для вас, так и для других. А в случае КМ, движущегося по орбите, ситуация принципиально иная. Длительность пребывания техногенного КМ в ОКП зависит, прежде всего, от высоты его орбиты и может достигать десятков, сотен, тысяч и миллионов лет, например для КО на геостационарной орбите (ГСО). И все это время КМ продолжает оставаться многоплановой угрозой. О прогрессирующем характере засорения ОКП говорит следующий показательный факт. Более чем за 60 лет космической эры было осуществлено свыше 5000 запусков искусственных спутников Земли (ИСЗ), и только 10 из них породили одну треть каталога КО. Но наиболее показательно то, что из этой десятки шесть приходится на последние 10–15 лет.

Рис. 1.

**ДИНАМИКА ЗАСОРЕНИЯ
ОКП (В ТОМ ЧИСЛЕ
МЕЛКИМ КМ РАЗМЕРОМ
1–2,5 мм)
С 1957 ПО 2018 Г.**

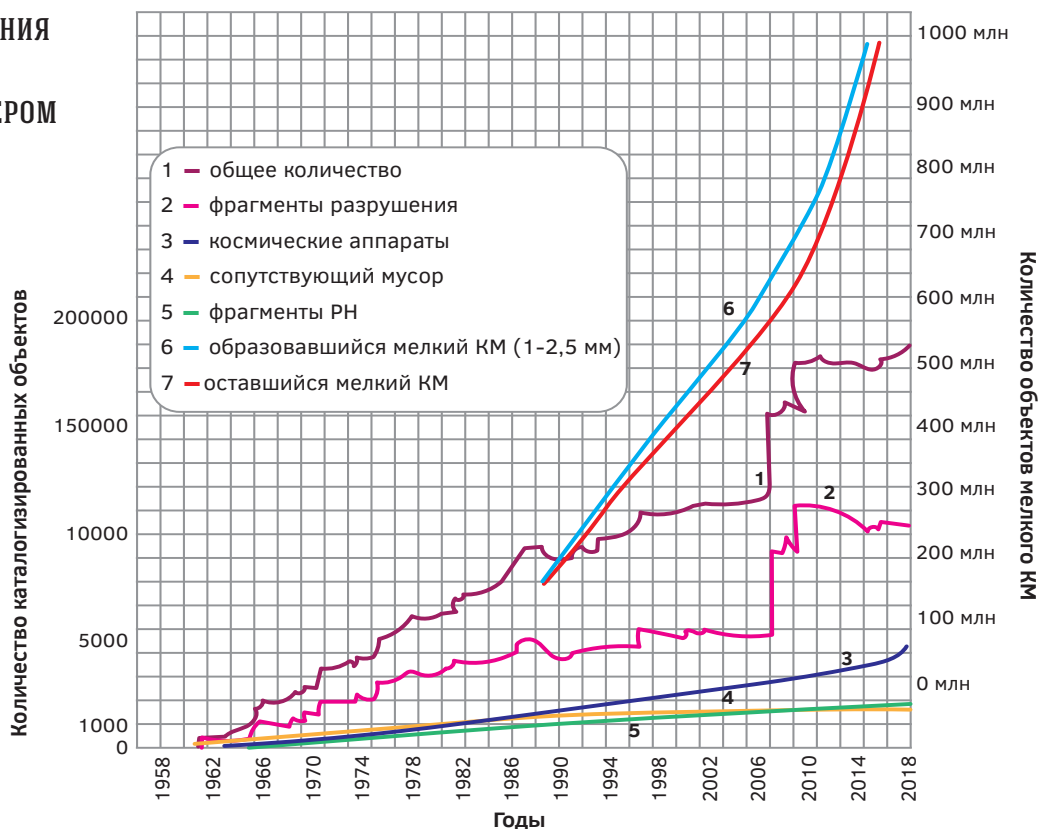
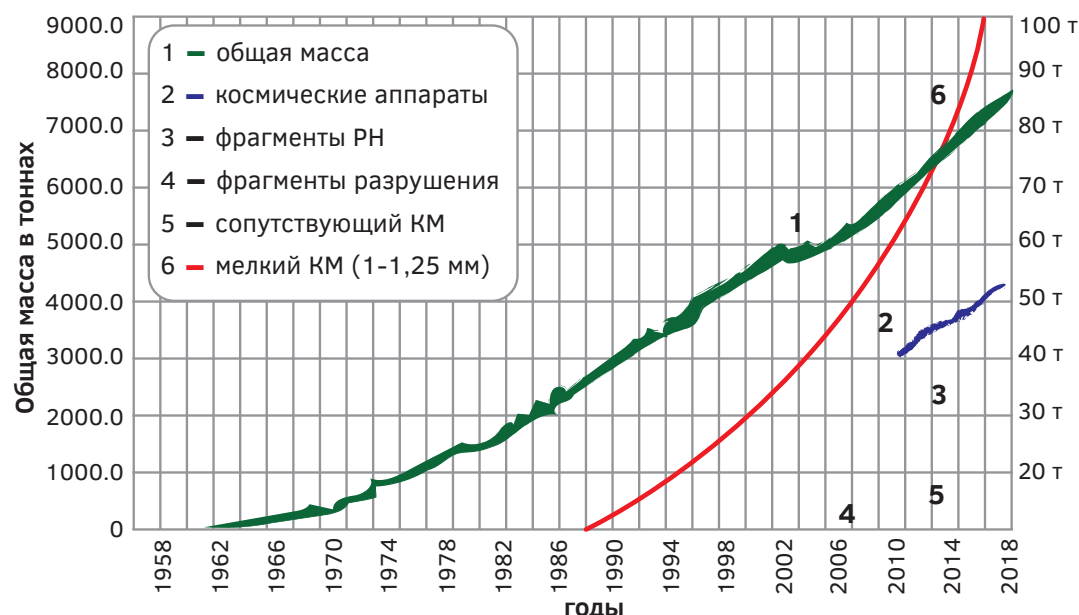


РИС. 2.
РОСТ СУММАРНОЙ МАССЫ КМ



МЕЛКАЯ ФРАКЦИЯ КМ И ЕЕ УГРОЗЫ

О последствиях засорения ОКП крупным, каталогизированным, КМ говорилось достаточно много, а вот опасность мелкого часто игнорируется, но именно с ним связаны наиболее сложные проблемы. Получению более полного представления о мелком КМ — о его количестве, составе, распределении в пространстве, динамике и степени опасности — препятствуют по крайней мере два фактора. Это явная недооценка его опасности и дефицит соответствующих измерений, являющийся прямым следствием нехватки средств, способных его наблюдать — не только в нашей стране, но и во всем мире.

В оценках опасности мелкого КМ следует отталкиваться не столько от массы, сколько от количества и скорости частиц, точнее от ее квадрата, и ряда других особенностей мелкого КМ и его контроля. Например, в отличие от мелкого КМ многие отработавшие КА уводятся с рабочих орбит в плотные слои атмосферы, где затем сгорают, или на орбиты захоронения. Этого пока нельзя сделать с мелким КМ, особенно на сравнительно высоких орбитах.

На рис. 1 представлено (по данным многолетних наблюдений, анализа поверхностей возвращенных из космоса КО, лабораторных исследований,

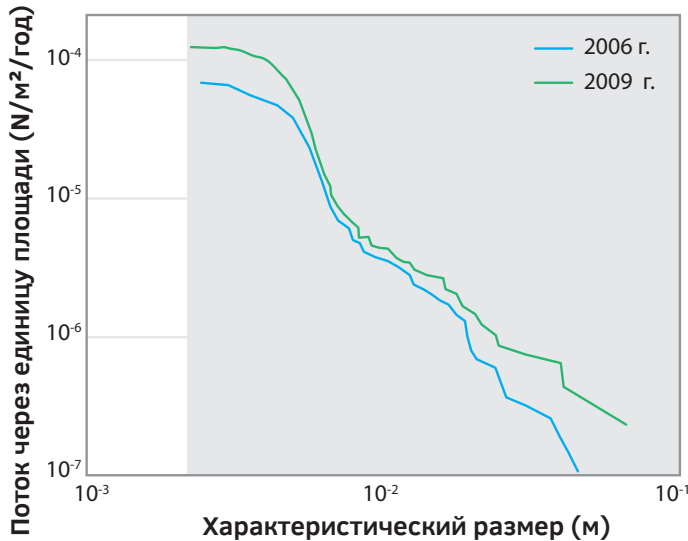
экспериментов и моделирования) изменение количества КМ в ОКП с 1957 по 2018 год. Из этих данных следует, что происходит прогрессивное засорение космоса во всех диапазонах размеров КМ. Кривая 6 представляет динамику образования мелкого КМ (размером 1–2,5 мм в диапазоне высот 400–2000 км), а кривая 7 — остающееся количество после частичного его сгорания (в среднем 10% в год) [2].

Можно приближенно рассчитать нарастание массы мелкого КМ в ОКП на фоне роста массы крупных КО. Спектральный анализ кратеров на поверхности КА от столкновений с КМ показывает, что состав КМ включает едва ли не всю таблицу Менделеева.

Однако в основном КМ состоит из алюминия. Значительно меньше в нем кальция, магния, титана, железа, меди, олова, свинца, никеля, хрома, серебра, золота, прочих металлов, кремния, композитных материалов и пластмасс [3]. Исходя из известных оценок их пропорции, примем условную среднюю плотность частиц КМ равной 3 г/см³ (у алюминия она равна 2,7 г/см³). В таком случае получим для фракции КМ размером 1–2,5 мм только в низкоорбитальной области (для высот от 400 до 2000 км) кривую изменения суммарной массы, представленную на рис. 2 (кривая 6).

Из графиков на обоих рисунках видно, что нарастание количества и массы мелкого КМ происходит стремительнее, чем крупного

Рис. 3.
СРАВНЕНИЕ ПОТОКОВ МЕЛКОГО КМ ЧЕРЕЗ
ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ НА ВЫСОТАХ 800-900 КМ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРОВ КМ



(в обоих случаях в среднем экспоненциально). Количественно это подтверждается следующим фактом. В 1994 году масса мелкого КМ указанного размера составляла менее 0,5% от общей массы КМ, а к 2018 году их соотношение достигло 1,4%, то есть за 24 года возросло почти в три раза. В абсолютном выражении количество мелкого КМ выросло со 172 млн до 1,25 млрд, то есть более чем в семь раз. В том же соотношении возросла и его суммарная масса. И это только в низкоорбитальной области, где она в 2018 году заметно превысила 100 т и в 2019 году продолжала расти.

К сожалению, для составления более полной и достоверной картины распределения мелкого КМ во всем ОКП не хватает достаточной информационной базы по этой категории КМ. К настоящему времени доступны измерения потоков мелкого

В настоящее время доступны измерения потоков мелкого космического мусора на высотах до 600 км. При этом по фрагментарным данным бортовых детекторов и измерениям радаров «Хейстек» и ХЭКС реально существуют более мощные его потоки на больших высотах – от 700 до 1000 км.

КМ в основном на высотах до 600 км. При этом по фрагментарным данным бортовых детекторов и измерениям радаров «Хейстек» и ХЭКС реально существуют более мощные его потоки на больших высотах, в частности от 700 до 1000 км. Кроме того, измерения бортовых детекторов ударов КМ еще в 2001 году показали, что в области геостационарного пояса потоки мелкого техногенного КМ количественно превышают естественные метеороидные потоки по крайней мере в пять раз [4]. В последующий период ввиду ряда разрушений на ГСО и отсутствия тормозящей движение КМ атмосферы это соотношение, разумеется, увеличилось.

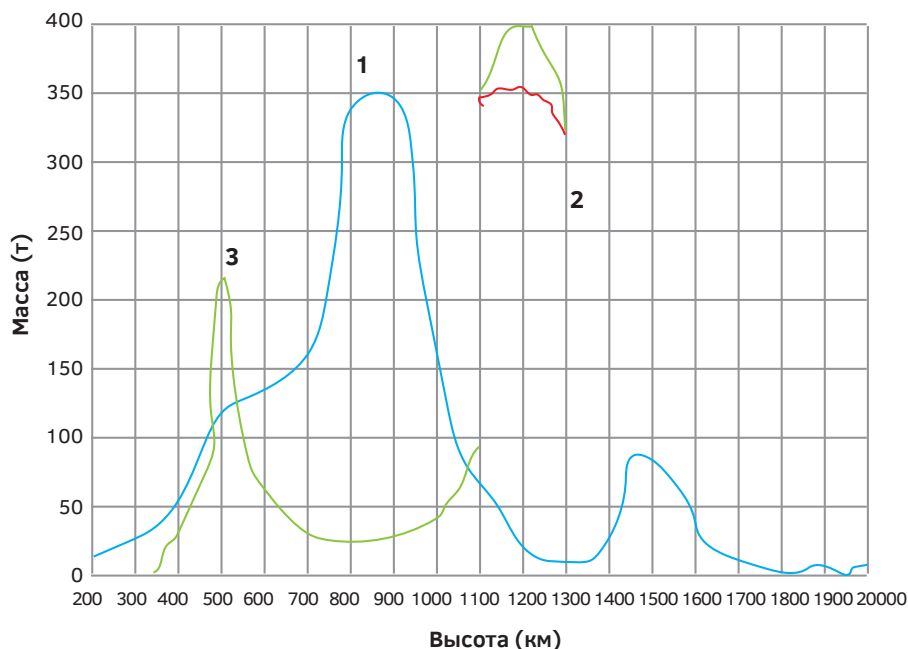
Можно с недоверием относиться к результатам моделирования, но не к данным реальных наблюдений. Специально для скептиков приведем следующую неоспоримую и показательную информацию для оценки прогрессирующего роста мелкой фракции КМ (размером от 1 мм до 10 см). На рис. 3 приведены соответствующие графики с интервалом три года. Данные получены по реальным наблюдениям радаров «Хейстек» и ХЭКС в 2006 и 2009 годах в одной из наиболее загруженных орбитальных областей (на высотах от 800 до 900 км) [5]. Сравнение кривых показывает, что за указанный период (три года) прирост количества мелкого КМ размером вплоть до границы размеров каталогизированных КО в данной области составляет в среднем 20–30%.

Во всем мире к настоящему времени независимо построено, откалибровано и отвалидировано множество моделей для оценки состояния и прогнозирования засоренности ОКП. Все они предсказывают ее экспоненциальный рост на сотни лет вперед даже в случае если человек прекратит все запуски вообще.

Стремительное увеличение количества КМ (именно количества, а не массы) столь же стремительно приближает нас к началу каскадного эффекта, так называемого синдрома Кесслера — расширяющегося цепного процесса образования вторичных осколков в результате все учащающихся столкновений КО после превышения критической плотности КМ в некоторой области ОКП. Это неизбежно приведет к вынужденному прекращению космической деятельности в относительно недалеком будущем. Однако несмотря на все эти предостережения ряд коммерческих компаний планирует запуск в низкоорбитальную область (ниже 2000 км) трех телекоммуникационных космических систем (КС), состоящих из нескольких тысяч КА класса 100–300 кг. По данным последней версии цифровой модели НАСА LEGEND [6], в случае реализации этого проекта ситуация с техногенным насыщением в этой важной оперативной области суще-

Рис. 4.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ МАССЫ КО В НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПО ВЫСОТАМ НА 01.01.2018



ственно осложнится. Если отказаться от этого проекта, то к 2215 году засоренность ОКП (как крупным, так и мелким КМ) возрастет примерно на 25% по сравнению с текущей. А в результате развертывания этих КС ее рост превысит 290% даже при условии регулярного увода с рабочих орбит 90% отработавших КА и погружения их в атмосферу. При этом рост катастрофических столкновений (с полным разрушением КО) в низкоорбитальной области составит 260 % при тех же условиях. Эти данные относятся только к каталогизированным (крупным) КО и не учитывают влияния мелкого КМ. А столкновения с последними также могут быть катастрофическими, что будет продемонстрировано ниже.

Для наглядности на рис. 4 [2] представлено распределение массы крупного КМ в низкоорбитальной области по высотам на 2018 год по данным каталогов КО СККП США и РФ — кривая 1 без учета развертывания КС. Для сравнения приводится также чистый природный состав количества КО в каталогах в результате потенциального запуска КС — кривая 2. Кривая 3 демонстрирует дополнительное количество КМ, образовавшееся в результате развертывания КС. Распределение мелкого КМ (на рисунке не показано) ввиду существенной корреляции с распределением крупного аналогично (но не идентично) суммарному (кривые 1 и 2) с некоторым смещением влево (вследствие более заметного атмосферного торможения).

Угроза для космической деятельности и экологии Земли и ОКП, представляемая КМ (как крупным, так и мелким), многолика. КМ опасен:

- для действующих КА из-за неуклонно возрастающей вероятности столкновений с ним;

- для наземных сооружений (особенно для ядерных объектов и хранилищ химического и бактериологического оружия) и населения Земли из-за возможного падения на Землю крупных обломков, преодолевших сопротивление атмосферы. По данным ООН, 80% населения Земли либо находятся в легких укрытиях, либо вообще не защищены от падающих на Землю обломков КО, а крупные обломки падают на Землю 1–2 раза в неделю [8];

- для экологии Земли и ОКП, так как снижает прозрачность атмосферы и околоземного космоса, нарушая сложившийся за миллиарды лет световой и теплообмен между Землей и космосом, а также создает помехи астрономическим наблюдениям;

- для состояния засоренности ОКП, ускоряя наступление каскадного эффекта.

За перечисленные угрозы ответственен как крупный, так и мелкий КМ. Поэтому специально рассмотрим опасность для космической деятельности и экологии, обусловленную именно мелким КМ, исходя из его особенностей и особенностей его контроля. Эти особенности и сама опасность состоят в следующем:

На данный момент во всем мире независимо построено, откалибровано и отвалидировано множество моделей для оценки состояния и прогнозирования засоренности околоземного космического пространства. Все они предсказывают ее экспоненциальный рост на сотни лет вперед даже в случае если человек прекратит все запуски вообще.

- 1) современные каталоги СККП не содержат информации о мелком КМ, то есть в них нет данных о параметрах движения его элементов, что не позволяет рассчитывать и совершать маневры уклонения от столкновения с ним;
- 2) мелких КО (размером менее 10 см) на несколько порядков больше, чем крупных (каталогизированных), и этот разрыв прогрессивно увеличивается;
- 3) значительно труднее осуществлять мониторинг хотя бы потоков мелкого КМ — об индивидуальном контроле движения его частиц вообще не может быть и речи. Это связано как с его количеством, малодоступностью его наблюдения существующими средствами, так и с более быстрым изменением распределения его скоплений и кинетических параметров (как следствие большего отношения площади поверхности к массе и, таким образом, большей степени атмосферного торможения);
- 4) в случае столкновения мелкого КМ с действующим КА причиняемый ущерб сильно зависит (значительно сильнее, чем при столкновении с крупным КМ) от параметров столкновения (угла вектора скорости частицы КМ к поверхности КА, уязвимости места удара и т. д.);
- 5) прозрачность атмосферы и ОКП снижается преимущественно в результате накопления мелкой фракции КМ, что влияет не только на общий характер свето- и теплообмена Земли со средой, но и, в частности, на степень диссоциации молекулярного кислорода и озона на высотах 15 – 30 км, то есть на изменения в озоновом слое Земли;
- 6) при оценке опасности столкновения с мелким КМ и вообще его накопления в ОКП (ее степени и характера) следует исходить не столько из его массы, сколько из его количества и скорости, поэтому в разной степени опасен мелкий мусор любого размера.

Официально о столкновениях в космосе основная масса населения узнает из СМИ, которые освещают лишь случаи столкновений и разрушений крупных КО. Столкновения же с мелкими КО, если они не причиняют существенного ущерба действующему КА, как правило, остаются за кадром, не говоря уже о столкновениях мелких КО между собой. Однако и теоретически, и экспериментально доказано, что основным источником образования мелкого КМ (то есть насыщения ОКП техногенным мусором) являются взаимные столкновения некаталогизированных (сравнительно мелких) КО. Именно столкновения, так как при них образуется значительно больше мелкого КМ, чем при взрыве, к тому же столкновения происходят намного чаще, чем взрывы, и с нарастающей частотой. При этом столкновения мелких КО — значительно чаще, чем крупных. Например, вклад столкновений некаталогизированных КО (размером менее 10 см) в образование КМ размером от 1 до 10 мм по крайней мере на несколько порядков больше вклада взаимных столкновений каталогизированных КО. По расчетам отечественных и зарубежных специалистов, от столкновений КО ежегодно образуется свыше 30 млн фрагментов размером от 1 до 2,5 мм, и лишь 10% из них сгорает в результате атмосферного торможения [7].

Эти расчеты нетрудно подтвердить известными примерами. 10 февраля 2009 года катастрофически столкнулись нефункционирующий российский «Космос-2251» и действующий американский «Иридиум 33». За последовавшие за разрушением несколько лет было каталогизировано 1800 обломков (разумеется, крупных). Вместе с тем наблюдения некоторых способных обнаруживать мелкие КО радиолокационных и оптических средств (в частности, радаров «Хейстек», ХЭКС и др.) и использование известных моделей (ORDEM, MASTER, PROOF, SDPA и др.) показали наличие большого числа мелких фрагментов. Результаты отражены в табл. 1.

Моделирование позволило также оценить среднее количество столкновений КО разных размеров в год – см. табл. 2 [7].

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ОПАСНОСТИ КМ

Естественно поставить вопрос о мере опасности любого конкретного состояния техногенной засоренности ОКП для космической деятельности. В качестве такой меры (хотя бы теоретически) можно принять суммарную кинетическую энергию всех техногенных объектов в ОКП или пропорциональную ей величину. Поскольку размеры КО охватывают очень широкий диапазон

ТАБЛ. 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ ОТ СТОЛКНОВЕНИЯ КА «КОСМОС-2251» И «ИРИДИУМ»

Размер	> 1 м	20 см – 1 м	10 см – 20 см	1 см – 5 см	2,5 мм – 1 см	1 мм – 2,5 мм
Количество	2	130	652	145 200	1 480 000	6 250 000
Масса, кг	360	600	155	153	63	30

ТАБЛ. 2. СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СТОЛКНОВЕНИЙ N_{cp} В ГОД КМ РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ

Размер, см	0,1	0,2	0,5	1	5	10	20
N_{cp}	220	325	5,2	0,854	0,123	0,052	0,038

значений — от десятков метров до долей микрометра, общую оценку опасности по разным сообщениям целесообразно, хотя и весьма условно, разбить на несколько слагаемых, каждое из которых отражает свой собственный характер опасности и должно учитываться со своим весом:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = \\ = w_1 \sum_{i \in P_1} m_i v_i^2 + w_2 \sum_{i \in P_2} m_i v_i^2 + w_3 \sum_{i \in P_3} m_i v_i^2 + w_4 \sum_{i \in P_4} m_i v_i^2.$$

В первом слагаемом суммирование ведется по популяции P_1 КМ размером более 10 см (каталогизированные КО). P_1 — это каталогизированные объекты. Столкновение с ними как действующих КА, так и пассивных КО катастрофично. Однако высокая точность известных параметров движения каталогизированных КО позволяет заблаговременно предвидеть их опасные сближения с КА (и другими каталогизированными КО) и успешно совершить маневр уклонения от столкновения, разумеется, при наличии такого ресурса. Поэтому главная опасность КО из популяции P_1 — в возможности столкновения с объектами популяции P_2 и некоторыми (имеющими опасно высокие массу и скорость сближения с объектами P_1) КО популяции P_3 . В результате таких столкновений образуется большое количество фрагментов разрушения.

Популяция P_2 опасна, прежде всего, отсутствием сведений об элементах орбит ее элементов с точностью, достаточной для расчета маневра уклонения от них, и столкновения с ними, если они случатся, скорее всего, будут катастрофичными.

Весьма многочисленны популяции P_3 и P_4 , что усугубляет их опасность. При достаточно высокой относительной скорости сближения элемен-

ты P_3 могут привести к катастрофичности столкновения с объектами первых трех групп. Кроме того, из-за многочисленности этих популяций и их прогрессирующего роста все ощутимее становится их воздействие на сложившуюся и относительно стабилизировавшуюся в течение многих миллионов лет экологию Земли и верхних геосфер, в частности, свето- и теплообмен между ними и внешней средой.

Типичным ущербом для некоторых космических программ от популяции P_4 является повреждение ее частицами чувствительных поверхностей выносных бортовых приборов (телескопов, солнечных панелей, угловых отражателей, датчиков излучений, детекторов столкновений с элементами КМ и т. п.). Однако есть примеры более серьезных исходов столкновений с ними. В 2013 году российский метрологический спутник «Блиц» был разрушен на высоте 825 км при столкновении с микрочастицей массой ~ 0,035 г размером ~3 мм при относительной скорости столкновения ~12,3 км/с [7, 9]. Американский спутник Sentinel-1A столкнулся с микрочастицей массой около 0,2 г и получил вмятину диаметром 40 см (это зафиксировала бортовая камера), изменил орбиту, поменял ориентацию, снизилась также мощность его солнечных батарей [10]. Еще один американский спутник Telesat-1A был выведен из строя микрометеороидом — на этот раз естественным, но так или иначе мелким мусором.

В заключение рассмотрим военный аспект опасности мелкого КМ. При столкновении КА с каталогизированным и надежно отслеживаемым КО причина разрушения или выхода из строя КА очевидна и легко объяснима. Однако в течение последних десятилетий многократно наблюдались внезапные выходы из строя КА военного назначения, причины которых так

и не удалось установить ни с помощью наблюдений, ни посредством телеметрии. Остаются два возможных объяснения — незарегистрированное столкновение с КМ или «происки» космического противника. А это уже политически опасная дилемма [1, 11]. Не всегда страна – собственник подвергнутого воздействию КМ КА может оперативно определить действительную причину его выхода из строя. Строго говоря, КМ с военной точки зрения представляет собой мощную независимую неуправляемую опасную космическую группировку, способную повредить или уничтожить как военный, так

и гражданский КА или наземный объект. С другой стороны, человечество стало разрабатывать способы борьбы с КМ. Однако принципиально эти способы могут применяться не только к КМ, но и к действующим КА. В отличие от КМ они являются активными и имеют своих конкретных операторов, представляющих конкретные государства, и при определенных намерениях своих операторов также могут представлять угрозу для действующих КА других государств. Иначе говоря, и КМ, и методы борьбы с ним могут рассматриваться как космическое оружие.

ВЫВОДЫ

- Космический мусор любого размера представляет потенциальную и реальную опасность для действующих КА и для экологии ОКП.
- Количество мелкого КМ в ОКП на несколько порядков превосходит численность крупных, каталогизированных, КО и прогрессивно растет.
- В наиболее плотно заселенной низкоорбитальной области (на высотах до 2000 км) относительные скорости КА и КМ могут превышать 15 км/с, а в перигейной области высокоэллиптических орбит — 17 км/с. Следовательно, столкновения с КМ размером 1 см и меньше при таких скоростях могут нанести КА значительный ущерб.
- Пылевидные частицы КМ регулярно повреждают солнечные панели, иллюминаторы и оптические поверхности бортовых наблюдательных инструментов и даже могут уничтожить КА или заметно снизить эффективность его функционирования, как это уже было в случае с российским КА «Блиц» и американскими Sentinel и Telecom-1A.
- В отличие от сближения действующего КА с крупными КО (каталогизированными и легко отслеживаемыми), сближения с мелким КМ не отслеживаются. Поэтому невозможно совершить маневр уклонения от столкновения с ним. Такое столкновение может произойти неожиданно как для российской стороны, так и для страны-собственника (например, потенциального противника). При отсутствии оперативной информации о причинах выхода из строя КА это событие может быть истолковано как нападение на космическую собственность со стороны вероятного противника, что чревато военно-политическим конфликтом.
- Прогрессивный рост техногенного засорения ОКП как крупным, так и мелким КМ неуклонно приближает наступление каскадного синдрома Кesslera. Многие специалисты считают, что цепной процесс уже начался в некоторых орбитальных областях и некоторых фракциях мелкого КМ. Этот процесс в относительно недалеком будущем неизбежно приведет к вынужденному прекращению космической деятельности.
- Рост количества КМ обостряет вопрос о целесообразности совершения маневра уклонения от столкновения с ним автоматических (не пилотируемых) КА, который требуется производить все чаще. При этом заметно сокращается энергетический ресурс КА и, как следствие, срок его активного использования. Во всяком случае, напрашивается необходимость пересмотра соответствующего критерия (сейчас общепринятая норма предельной расчетной вероятности столкновения составляла 10^{-4}).
- Стремительный процесс засорения ОКП КМ (особенно мелким) ведет к нарушению сложившегося за многие миллионы лет свето- и теплообмена между Землей, ОКП и внешней средой. Это наносит экологический ущерб, в частности озоновому слою Земли.

• Особую проблему представляют ограниченные возможности мониторинга мелкого КМ. Узким местом в исследовании и решении проблем, связанных с мелким КМ, является дефицит измерений. Проблема осложняется еще и тем, что изменение состояния засоренности ОКП мелким мусором значительно более динамично, чем крупным (ввиду большего отношения площади поверхности к массе). Поэтому весьма насущным является создание и совершенствование средств наблюдения мелкого КМ, расширение возможностей и увеличение количества (точнее, площади рабочей поверхности) бортовых детекторов их ударов (технология in situ).

• Еще больше проблема обостряется из-за отсутствия эффективных способов удаления мелкого КМ, особенно с относительно высоких орбит.

• Меры сдерживания техногенного засорения и снижения засоренности ОКП как крупным, так и мелким мусором перестанут быть эффективными с началом каскадного эффекта. Поэтому их основная цель — не допустить его развития. Это определяет срочность и неотвратимость их применения всеми странами, участвующими в освоении космоса. Но поскольку некоторые из таких мер могут рассматриваться как космическое оружие, внедрять и применять их нужно под строгим международным контролем.

Литература

1. Вениаминов С. Космический мусор – угроза человечеству. Изд. 2-е, исправл. и дополн. М.: ИКИ РАН, 2013. 207 с.
2. Адушкин В., Аксенов О., Вениаминов С., Козлов С., Дедус Ф. О популяции мелкого космического мусора, ее влиянии на безопасность космической деятельности и экологию Земли // Международная конференция «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы», Москва, 7-19 апреля 2019 г.М.: ИНАСАН, ИКИ РАН, 2019.
3. Bernhard R. et al. Analytical electron microscopy of LDEF impactor residues // LDEF 69 Months in Space, 3d Post-Retrieval Symposium, NASA CP 3275, 1993, part 1, pp. 401-427.
4. Drolshagen G., Nehls T., The Small Size Debris Population in the GEO Belt // Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2009.
5. Hamilton J. NASA Develops Report on Radar Observations of Small Debris Populations // Orbital Debris Quarterly News. 2013. Vol. 17. Iss. 4. Pp. 4-5.
6. Liou J.-C., Matney M., Vavrin A. et al. NASA ODPO's Large Constellation Study // Orbital Debris Quarterly News. 2018. Vol. 22. Iss. 3. Pp. 4-7.
7. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с.
8. Orbital Debris Quarterly News. 1997. Vol. 2. Iss. 4. P. 7.
9. Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S. Challenging aspects in evaluating the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights // Advances in Astrophysics. 2018. Vol. 3. No. 2. Pp. 83–90.
10. Королёв В. ESA показало последствия столкновения спутника с космической песчинкой [Электронный ресурс] // N+1. 2016. 31 августа. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/08/31/sentinel-hit> (Дата обращения: 11.08.2019).
11. Adushkin V., Veniaminov S., Kozlov S., Silnikov M. Orbital missions safety – A survey of kinetic hazards // Acta Astronautica. 2016. Vol. 126. Pp. 510–516.

References

1. Veniaminov S. Kosmicheskij musor – ugroza chelovechestvu. 2st Edition. Moscow: IKI RAN, 2013. 207 p.
2. Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S., Dedus F. O populyatsii melkogo kosmicheskogo musora, ee vliyani na bezopasnost' kosmicheskoy deyatel'nosti i ekologiyu Zemli. Mezhdunarodnaya konferentsiya "Kosmicheskij musor: fundamental'nye i prakticheskie aspekty ugrozy" (April 17-19, 2019, Moscow). Moscow: INASAN, IKI RAN, 2019.
3. Bernhard R. et al. Analytical electron microscopy of LDEF impactor residues. LDEF 69 Months in Space, 3d Post-Retrieval Symposium, NASA CP 3275, 1993, part 1, pp. 401-427.
4. Drolshagen G., Nehls T., The Small Size Debris Population in the GEO Belt. Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany, 2009.
5. Hamilton J. NASA Develops Report on Radar Observations of Small Debris Populations. Orbital Debris Quarterly News, 2013, vol. 17, iss. 4, pp. 4-5.
6. Liou J.-C., Matney M., Vavrin A. et al. NASA ODPO's Large Constellation Study. Orbital Debris Quarterly News, 2018, vol. 22, iss. 3, pp. 4-7.
7. Nazarenko A. I. Modelirovanie kosmicheskogo musora. Moscow: IKI RAN, 2013. 216 p.
8. Orbital Debris Quarterly News, 1997, vol. 2, iss. 4, p. 7.
9. Adushkin V., Aksenov O., Veniaminov S., Kozlov S. Challenging aspects in evaluating the potential danger of space objects breakups and collisions for space flights. Advances in Astrophysics, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 83–90.
10. Korolev V. ESA pokazalo posledstviya stolknoveniya sputnika s kosmicheskoy peschinkoy. N+1. 2016. 31 August. Available at: <https://nplus1.ru/news/2016/08/31/sentinel-hit> (Retrieval date: 11.08.2019).
11. Adushkin V., Veniaminov S., Kozlov S., Silnikov M. Orbital missions safety – A survey of kinetic hazards. Acta Astronautica, 2016, vol. 126, pp. 510–516.



© Адушкин В.В., Аксёнов О.Ю.,
Вениаминов С.С., Козлов С.И., 2019

История статьи:

Поступила в редакцию: 12.07.2019

Принята к публикации: 09.08.2019

Модератор: Гесс Л.А.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Адушкин В. В., Аксёнов О. Ю., Вениаминов С. С., Козлов С. И.
Об оценке опасности мелкого космического мусора для
космической деятельности и экологии Земли // Воздушно-
космическая сфера. 2019. № 3. С. 72–81.