

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

**В.Ю. Ключников**, гл. науч. сотр. АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», д-р техн. наук, [klyushnikovvy@tsniimash.ru](mailto:klyushnikovvy@tsniimash.ru)

**С.А. Клементьев**, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, [klements@extech.ru](mailto:klements@extech.ru)

Рецензент: А.Ю. Потюпкин, АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», д-р техн. наук, [fotin853@mail.ru](mailto:fotin853@mail.ru)

*В статье рассматривается современное состояние фундаментальных и прикладных исследований проблемы космического мусора. В течение 50 лет исследований проблемы космического мусора были получены важные фундаментальные и прикладные результаты, позволившие лучше осознать реальную угрозу и понять механизмы загрязнения околоземного космического пространства. Особое внимание уделено новым аспектам проблемы, связанным с развертыванием многоспутниковых группировок.*

**Ключевые слова:** космический мусор, космический объект, исследования, околоземное космическое пространство, столкновение, угрозы, многоспутниковая группировка, синдром Д. Кесслера, система безопасности, математическое моделирование, обработка изображений, каталогизация, специальное программное обеспечение.

## CURRENT STATE OF FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH INTO THE PROBLEM OF SPACE DEBRIS

**V. Yu. Klyushnikov**, Chief Researcher, FSUE Central Research Institute of Mechanical Engineering, Ph. D., Professor, [wklj59@yandex.ru](mailto:wklj59@yandex.ru)

**S. A. Klementyev**, Head of Department, SRI FRCEC, [klements@extech.ru](mailto:klements@extech.ru)

*The article examines the current state of fundamental and applied research into the problem of space debris. Over the course of 50 years of research into the problem of space debris, important fundamental and applied results have been obtained that have made it possible to better understand the real threat and understand the mechanisms of pollution of near-Earth space. Particular attention is paid to new aspects of the problem related to the deployment of multi-satellite constellations.*

**Keywords:** space debris, space object, research, near-Earth space, collision, threats, multi-satellite constellation, D. Kessler syndrome, security system, mathematical modeling, image processing, cataloging, special software.

### Введение

Околоземное космическое пространство представляет собой ограниченный природный ресурс, подверженный деградации вследствие техногенного загрязнения различного рода объектами искусственного происхождения – космическим мусором (КМ).

Последние 60 лет количество орбитального мусора увеличивалось в геометрической прогрессии – как из-за расширения орбитальной группировки действующих космических аппаратов, так и из-за остающихся на орбите космических аппаратов, прекративших активное функционирование, отработавших ступеней ракет-носителей и разгонных блоков, а также из-за преднамеренных и случайных взрывов и столкновений различных космических объектов.

По состоянию на начало 2022 г., по данным сети космического наблюдения США (United States Space Surveillance Network) и статистического моделирования ЕКА, на околоземных орбитах находились около 5400 объектов космического мусора размером более 1 м, 34 000 объектов более 1 см, в том числе около 5000 активных спутников, 1 000 000 объектов размером от одного мм до одного см и более 1 000 000 000 объектов размерностью менее 1 мм.

Время баллистического существования низкоорбитального космического мусора различно и зависит от высоты орбиты. Время жизни КМ на орбите от 250 до 550 км составляет, в зависимости от миделя единичного фрагмента, от недель и месяцев до десятков лет. «Правило 25 лет», критичное для низких орбит (от 550 до 2000 км), при этом выполняется.

С высоты более 800 км сопротивление атмосферы ослабевает настолько, что космический мусор может оставаться там от 100–150 лет, а на высотах более 1200 км – до 2000 лет. Время баллистического существования космического мусора в области функционирования глобальных навигационных систем (20 000–22 000 км) и на геостационарной орбите (~36000 км) составляет тысячи лет. Но и пространственная плотность загрязнения этих орбит в десятки и сотни раз меньше, чем низких околоземных орбит.

Геостационарные (геосинхронные) орбиты (ГСО) как ресурс представляют особую ценность вследствие их специфических особенностей, а также из-за ограниченной емкости: количество точек стояния на ГСО составляет примерно 425, из которых 90 % уже занято активными спутниками. Точки стояния могут продаваться или сдаваться в аренду другим государствам и операторам. Стоимость одной точки стояния составляет 120–140 млн долл. США.

Растущее в геометрической прогрессии количество КМ несет возрастающие риски, является реальной угрозой для возможностей освоения околоземного космического пространства.

### Текущее состояние загрязнения околоземного космоса

Текущее состояние загрязнения околоземного космоса показано на графике на рис. 1 [1]. Как видно из графика, количество КМ на орбите увеличивается и по количеству фрагментов КМ, и по их массе (размерам). В последние годы появился новый класс фрагментов КМ – неопознанные объекты (UI). Это не обязательно какие-то новые объекты. Просто из-за малого интервала времени между их появлением и началом наблюдений иногда сложно определить источник (событие) фрагментации, в результате которого они появились.

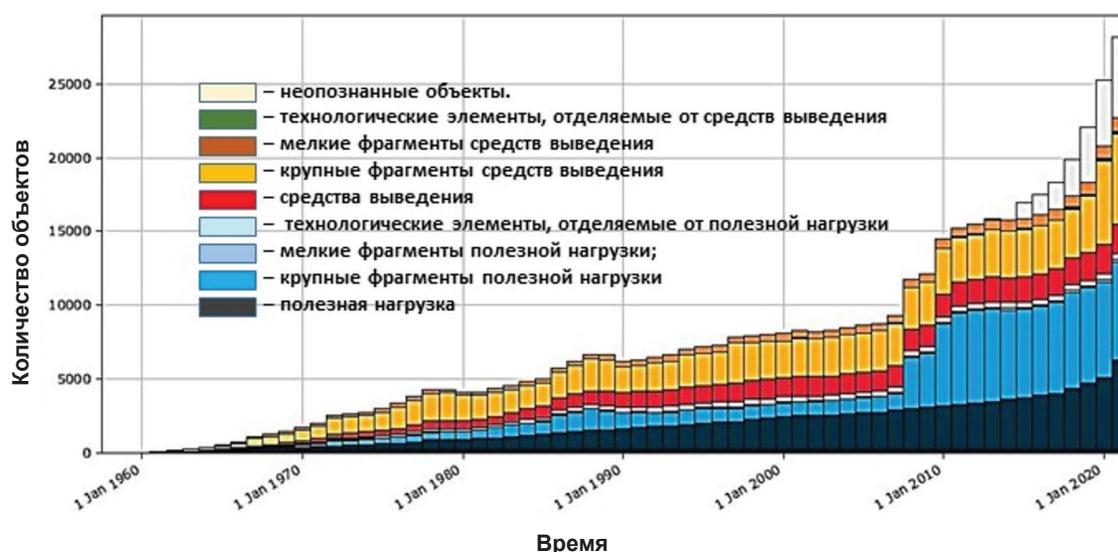


Рис. 1. Эволюция (рост) количества объектов в космосе

Основным источником образования КМ размерами от нескольких миллиметров до десятков сантиметров являются взрывы и столкновения космических объектов (КО). За последние два десятилетия среднее число таких событий оставалось стабильным и составляло примерно 12,5 в год. Решающим вкладом в увеличение орбитальной группировки КМ являлся все-таки фактор взрывов на орбите, обусловленных неизрасходованными остатками энергии на борту КО, в частности ракетного топлива и заряда аккумуляторных батарей. По этой причине международные руководящие принципы и национальные стандарты по ограничению образования КМ требуют, чтобы спутники были «пассивированы» в конце срока их активного существования, например путем опорожнения топливных баков и отключения аккумуляторов.

### **Проблемы многоспутниковых группировок**

Прогнозируется, что к исходу этого десятилетия на низких околоземных орбитах может оказаться свыше 57 000 малых космических аппаратов, прежде всего за счет развертывания многоспутниковых группировок. Причем максимум концентрации космического мусора различной размерности в области низких орбит приходится на орбиты развертываемых многоспутниковых систем информационного назначения.

Лидером в создании многоспутниковых группировок являются США, конкретно – компания SpaceX Илона Маска.

В США разрешение на запуски космических аппаратов связи дает Федеральная комиссия по связи (Federal Communications Commission – FCC). Корректность такой процедуры вызывает сомнения (фактически это нарушает статью I Договора по космосу 1967 г.), поскольку космос экстерриториален, и такого рода разрешительной деятельностью должен был бы заниматься международный, а не национальный орган (как это имеет место при выделении точек стояния спутников на геостационарной орбите: точки стояния в этом случае распределяются при посредничестве Международного союза электросвязи – ITU). Тем не менее FCC выдала разрешения компании SpaceX на запуск соответственно 12 000 (1-я очередь) и 42 000 (2-я очередь) малых спутников StarLink.

SpaceX полагает, что маневры по предотвращению столкновений могут фактически поддерживать работу группировки спутников StarLink без столкновений с космическим мусором: вероятность столкновения спутника с наблюдаемым фрагментом космического мусора ничтожно мала. При этом не учитывается ненаблюдаемый космический мусор. По существующим оценкам, вероятность поражения спутника StarLink ненаблюдаемым фрагментом мусора составляет примерно 0,003 в течение года.

Кроме того, FCC дает разрешение на развертывание многоспутниковой группировки без оценки воздействия на другие космические объекты. Это уже приводило к опасным сближениям спутников StarLink с другими космическими объектами.

Наконец, не нужно забывать, что помимо ненаблюдаемого космического мусора в околоземном космическом пространстве имеются также объекты естественного происхождения – метеороиды. Причем плотность потоков метеороидов в области миллиметровых и субмиллиметровых размеров превышает плотность потоков космического мусора таких же размеров.

Для группировки StarLink из 12 000 спутников (1-я очередь) существует примерно 50 %-ная вероятность 15 и более ударов метеороидов массой более 100 мг в год. В результате спутник может получить существенные повреждения.

В связи с появлением многоспутниковых группировок возникла проблема, которую можно было бы назвать световым загрязнением. Дело в том, что в сумеречное время солнечные лучи отражаются от поверхности плоских фазированных антенн спутников StarLink, и на исходных изображениях звездного неба, получаемых астрономами, появляются световые треки. Свечение от отдельно взятого спутника StarLink соответствует звездной величине от третьей до седьмой.

Существует мнение, что астрономия оказалась у критической черты, которую уже сейчас создали спутники StarLink компании SpaceX. Спутники могут мешать наземным наблюдениям, увеличивая сложность дифференциации искусственных спутников и естественных объектов, таких как астероиды и кометы.

В 2021 г. SpaceX пошла навстречу астрономам и стала запускать спутники, яркость которых снижена примерно в 4,6 раза (точное значение зависит от длин волн, которые фиксирует оборудование) за счет:

- специального покрытия для плоских антенн с фазированными решетками – технология DarkSat;
- установки специального козырька, защищающего антенны от солнечных лучей, – технология VisorSat.

Следует также заметить, что общее количество космических аппаратов (КА) в многоспутниковых группировках, принадлежащих разным операторам, а также число отказавших КА в будущем будет возрастать. Вероятно, не все операторы будут согласны принимать указанные выше меры или аналогичные им.

С точки зрения поддержания эффективности астрономических наблюдений, выходами из создавшейся ситуации могут быть:

- создание специального программного обеспечения, исключающего треки от спутников в результате обработки исходных изображений;
- более широкое использование космических (орбитальных) телескопов.

### Наблюдение за космическим мусором

В США наблюдением за КМ совместно занимаются следующие организации.

1. Министерство обороны США (The U.S. Department of Defense – DOD) выполняет функции обнаружения, каталогизации и слежения за низкоорбитальными фрагментами КМ размером 10 см и больше при помощи сети космического наблюдения (U.S. Space Surveillance Network), состоящей более чем из 30 наземных радаров и оптических телескопов, расположенных по всему миру, а также из 6 спутников на орбите, как показано на рис. 2.

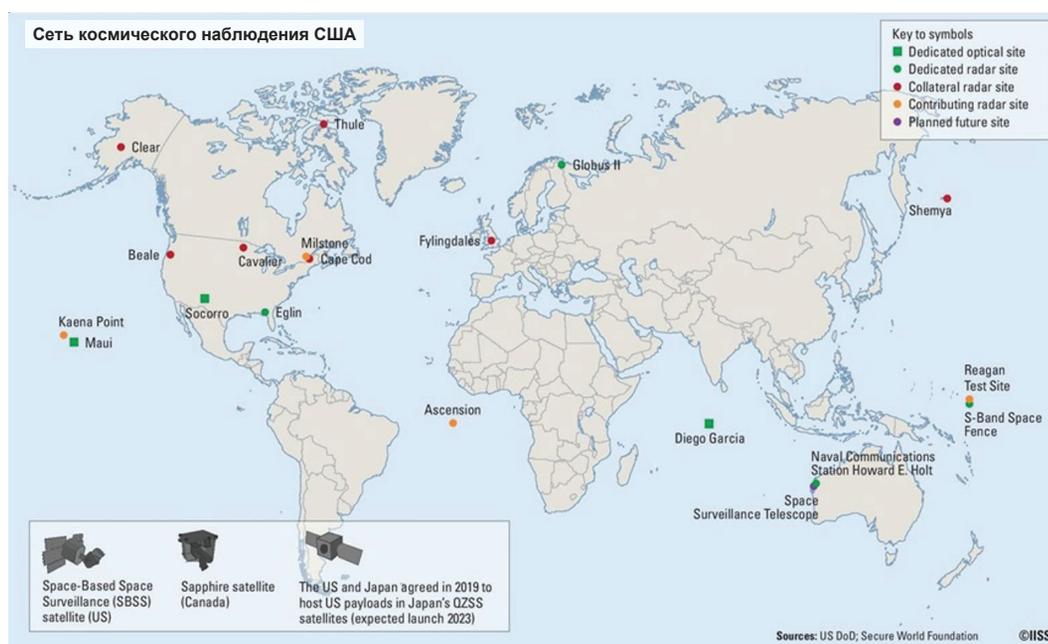
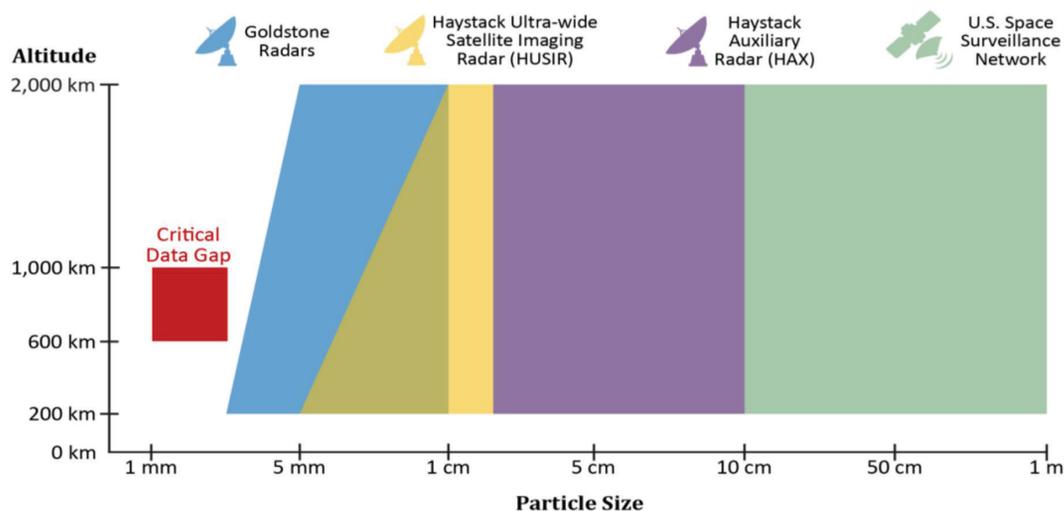


Рис. 2. Сеть космического наблюдения U.S. Space Surveillance Network

2. Офис программы NASA по орбитальному мусору (Orbital Debris Program Office – ODPO) занимается выборочным обнаружением, каталогизацией и слежением за низкоорбитальными фрагментами КМ размером менее 10 см, а также статистической оценкой распределения фрагментов космического мусора в околоземном пространстве. Для этого используются три наземных радара и оптические телескопы, а также данные исследований возвращенных на Землю космических аппаратов. Диапазоны обнаружения и слежения за орбитальными фрагментами космического мусора по его размеру и высоте орбиты в околоземном пространстве средствами программы NASA представлены на рис. 3.



Altitude – Высота орбиты

Particle Size – Размер фрагмента КМ

Goldstone Radars	– Радар Goldstone
Haystack Ultra-wide Satellite Imaging Radar (HUSIR)	– Сверхширокополосный спутниковый радар Haystack (HUSIR)
Haystack Auxiliary Radar (HAX)	– Вспомогательный радар Haystack (HAX)
U.S. Space Surveillance Network	– Сеть космического наблюдения США
Critical Data Gap	– Критический пробел в данных

**Рис. 3. Средства программы NASA по обнаружению, каталогизации и слежению за низкоорбитальными фрагментами космического мусора в околоземном пространстве**

Каталогизация включает идентификацию конкретных объектов, за которыми ведется наблюдение, и прогнозирование их местоположения в течение следующих 24–72 часов.

К проблемам системы наблюдения за КМ, в частности средств NASA, в настоящее время следует отнести:

– невозможность обнаружения космического мусора размером менее 3 мм в наиболее загрязненной области низких околоземных орбит – в диапазоне от 600 до 1000 км; между тем орбитальный мусор именно миллиметрового размера представляет наибольший риск повреждения и вывода из строя для большинства космических аппаратов, работающих на низких орбитах;

– ограниченные возможности обнаружения фрагментов размером менее 10 см на орбите МКС (для решения этой задачи NASA использует возможности Министерства обороны США).

К причинам этих проблем относят недостаточное финансирование, неполную эксплуатационную готовность наземных радиолокационных систем, а также конкуренцию приоритетов со стороны других пользователей.

### **Математическое моделирование загрязнения околоземного космического пространства**

Математическое моделирование загрязнения околоземного космического пространства космическим мусором заключается в оценке и прогнозе распределения фрагментов КМ в пространстве, движения потока фрагментов КМ и их физических характеристик (размеры, масса, плотность, отражающие свойства, особенности перемещения и др.).

Исходными данными для моделирования служат данные наземных оптических и радиолокационных наблюдений, оперативные данные об образовании фрагментов КМ, об изменении параметров орбиты космических объектов, экспериментальные результаты прямой фиксации соударений КМ с космическими объектами (КО) в космосе, а также наземное натурное моделирование высокоскоростных соударений КМ с КО и взрывов КО.

В настоящее время ведущими космическими агентствами используются четыре модели загрязнения околоземного космического пространства.

1. LEGEND (NEO-GEO Environment Debris) – полномасштабная трехмерная модель эволюции космического мусора, основная модель Управления программ НАСА по орбитальному мусору, предназначенная для изучения долгосрочного прогноза эволюции орбитальной группировки космического мусора на высотах от 200 до 50 000 км.

2. MASTER (Meteoroid And Space debris Terrestrial Environment Reference model) – инженерная модель Европейского космического агентства, позволяющая описывать эволюцию КМ и метеороидов.

3. ORDEM (Orbital Debris Engineering Model) – инженерная модель Космического центра NASA им. Джонсона.

4. SDPA (Space Debris Prediction and Analysis) – российская инженерная модель, разработанная А.И. Назаренко, позволяющая получать статистические распределения данных об интегральных характеристиках КМ в околоземном космическом пространстве.

Перечисленные модели дают достаточно хорошо согласованные результаты.

Следует заметить, что ни краткосрочные, ни долгосрочные модели не учитывают периодические всплески объемной концентрации КМ в результате разрушений космических объектов длительностью от нескольких часов до нескольких месяцев. А это очень важно для предотвращения столкновений на орбите сразу после фрагментации.

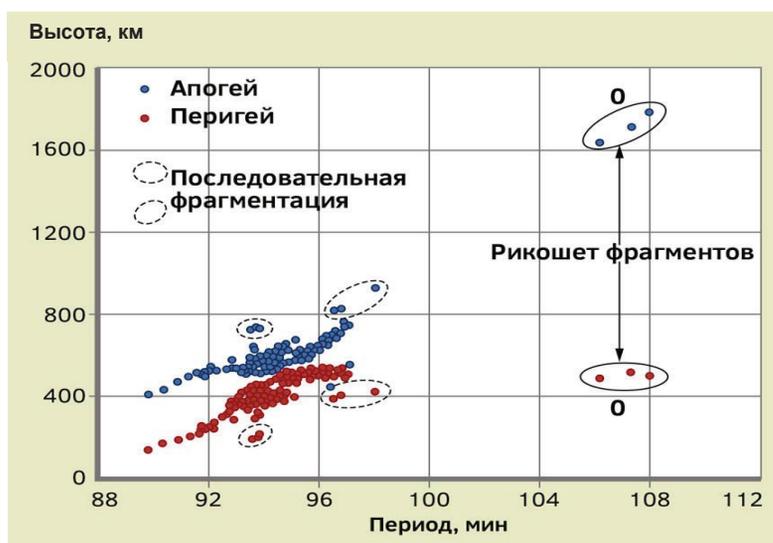
Примером такой модели, учитывающей периодические всплески объемной концентрации КМ, является модель офиса NASA по орбитальному мусору SBRAM (Satellite Breakup Risk Assessment Model), описывающая дискретное облако КМ на основе Стандартной модели дефрагментации спутника (Standard Satellite Breakup Model – SSBM).

### **Физические закономерности фрагментации космических объектов**

Основным источником образования новых фрагментов КМ является фрагментация космических объектов при столкновениях и взрывах.

В 80-х гг. XX в. США осуществили два эксперимента с преднамеренными столкновениями в космосе. При помощи противоспутниковой авиационно-космической системы ASAT был разрушен спутник наблюдения за Солнцем Solwind P78-1 (эксперимент Solwind). Скорость встречи кинетического блока системы ASAT со спутником на высоте 525 км составила около 7 км/с, угол – примерно 50°. В результате разрушения спутника Solwind образовалось 267 фрагментов [2].

Данные оптических и радиолокационных наблюдений за образовавшимися фрагментами спутника позволяют оценить распределение фрагментов КМ по скоростям и построить диаграмму Габбарда (рис. 4).



**Рис. 4. Диаграмма Габбарда для фрагментации спутника Solwind P78-1**

Сравнимые возмущения скорости группы осколков можно интерпретировать как признаки последовательной фрагментации. Дело в том, что в результате соударения в обоих столкнувшихся объектах под воздействием ударных волн образуются поверхностные трещины, приводящие к их разрушению. Неполные трещины в разлетающихся фрагментах, в свою очередь, распространяются дальше, образуя новые фрагменты. Причем изменения импульсов дополнительных фрагментов идентичны по направлению и величине. Этот факт и позволил зафиксировать явление последовательной фрагментации космических объектов при их столкновениях. По сути, это некий аналог цепного (каскадного) процесса разрушений при столкновениях.

Другая важная закономерность, выявленная по результатам наблюдений фрагментации космических объектов, – возможность образования в процессе разрушения единичных фрагментов, обладающих аномально большой скоростью и энергией. Необходимым условием образования «рикошетных фрагментов» при столкновении космических объектов является превышение угла встречи между ними значения  $124^\circ$ .

Эксперимент Delta 180 дал новые неожиданные результаты в феноменологии столкновений в космосе [3]. Разгонный блок и вторая ступень ракеты образовали собственные облака фрагментов КМ, что свидетельствует о практическом отсутствии передачи импульса количества движения при столкновении. Импульс был передан всего лишь нескольким фрагментам, разбросанным между двумя облаками КМ.

#### **Возможность каскадных столкновений на околоземных орбитах (синдром Д. Кесслера)**

Экстраполяция текущих темпов роста загрязнения околоземного космического пространства показывает нестабильную ситуацию с экспоненциально возрастающей частотой столкновений (рис. 1). Рост числа фрагментов космического мусора на околоземных орбитах может привести к цепной реакции увеличения числа столкновений между ними. Каждое столкновение приводит к разрушению сталкивающихся тел на множество фрагментов, а их растущее число увеличивает вероятность столкновений между ними (синдром Д. Кесслера).

По поводу реальности синдрома Д. Кесслера существуют полярные мнения.

Так, ошибочность мнения о неотвратимости синдрома Д. Кесслера заключается в предположении, что все фрагменты будут находиться в околоземном пространстве и будут угрожать столкновением со спутниками и другими фрагментами КМ. При столкновении кинетическая энергия сталкивающихся тел частично затрачивается на их разрушение, а частично взаимно гасится, в результате чего возникший рой фрагментов оказывается на эллиптических орбитах с высотой перигея внутри атмосферы Земли. Тела на этих орбитах успевают затормозиться и сгореть раньше, чем они испытают еще одно столкновение.

Однако существуют экспериментальные данные о практическом отсутствии передачи импульса при высокоскоростном столкновении объектов в космосе. Следовательно, на самом деле кинетическая энергия сталкивающихся тел практически не уменьшается.

А с учетом того, что в области низких орбит ожидается взрывной рост плотности космических объектов – малых КА многоспутниковых группировок, а также исходя из вероятности «триггерных эффектов», скачкообразно увеличивающих загрязнение околоземного космоса, вероятность синдрома Д. Кесслера исключить нельзя. К упомянутым «триггерным эффектам» следует отнести фрагментацию крупногабаритных космических аппаратов, по разным причинам длительное время остающихся на своих рабочих орбитах.

Международный коллектив ученых составил перечень из 50 таких объектов. Среди них, к примеру, – самый крупный спутник, запущенный Европейским космическим агентством Envisat (срок баллистического существования – 150 лет), спутник NASA Quick Scatterometer Earth (будет оставаться на орбите в течение 90 лет) и др.

По мнению авторов исследования, опубликованного в журнале Acta Astronautica, устранение этих объектов является приоритетной задачей в освоении космоса.

### **Перспективы уменьшения загрязнения околоземного космического пространства**

Национальные космические агентства и международное сообщество в целом стремятся, по крайней мере, ограничить темпы загрязнения околоземного космоса с тем, чтобы отсрочить наступление возможного синдрома Д. Кесслера до появления технологических возможностей по его радикальному предотвращению. Для этого используются в основном меры нормативного регулирования, затрагивающие конструкцию и функционирование ракет-носителей (РН) и КА (ограничение числа технологических элементов, отделяемых в процессе выведения КА и его эксплуатации на орбите, удаление отработавших КА и ракетных блоков (РБ) из зоны рабочих орбит в зону захоронения или в плотные слои атмосферы, минимизация рисков самопроизвольного разрушения КА, РН, РБ и др.).

Многочисленные исследования, в том числе проведенные Межагентским координационным комитетом по космическому мусору (МККМ), показали, что рост низкоорбитальной группировки космического мусора можно замедлить, обеспечив:

- удаление с орбиты не менее 90 % всех КА в течение 25 лет после окончания их активного функционирования;
- активное удаление с орбиты по крайней мере 5 вышедших из строя КА (которые не могут сойти с орбиты самостоятельно) ежегодно.

За последнее десятилетие в конструкции 15–30 % запускаемых низкоорбитальных автоматических космических аппаратов были предусмотрены средства увода с орбиты после окончания активного функционирования. Фактически ежегодно (успешно) уводилось с орбиты от 5 до 20 % спутников. В 2018 г. этот показатель достиг 35 % из-за активного увода с орбиты спутников системы «Иридиум». Успешно удалялось с орбиты от 30 до 70 % отработавших ракетных блоков.

Спутники на геостационарной орбите имеют очень высокие показатели соблюдения мер по уменьшению загрязнения околоземного космоса: в последнее десятилетие в конструкции от 85 до 100 % геостационарных КА были предусмотрены мероприятия по уводу из защищаемой области в конце срока активного функционирования. Фактически с геостационарной орбиты было уведено от 60 до 90 % спутников.

## Заключение

Для сохранения возможности дальнейшего освоения околоземного космического пространства как природного ресурса очевидно необходимо ужесточать требования по ограничению и предотвращению загрязнения околоземного космоса, более активно реализовать меры по быстрому удалению из операционных областей нефункционирующих космических объектов и фрагментов космического мусора, систему безопасности КА в околоземном пространстве выстраивать в глобальном масштабе.

## Список литературы

1. ESA's Annual Space Environment Report. ESA Space Debris Office, Darmstadt: 27 May 2021, 106 p.
2. Tan G.D., Badhwar F.A. Allahdadi & D.F. Medina. Analysis of the Solwind fragmentation event using theory and computations. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1996, vol. 33, Iss. 1, P. 79–85.
3. Kasper R.L., Young N.A. Delta 180 Collision and Fragmentation Analysis. Xontech (July 1987).
4. Ключников В.Ю. Индустриализация как стратегическая парадигма освоения и использования космического пространства // *Воздушно-космическая сфера*. 2018. № 2 (95). С. 14–21.
5. Ключников В.Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора (КМ) // *Воздушно-космическая сфера*. 2019. № 1 (98). С. 96–107.
6. Вениаминов С.С., Ключников В.Ю., Логинов С.С. Обзор методов противодействия техногенному засорению околоземного космического пространства и его снижения // В сб.: *Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы*. Сер. «Механика, управление и информатика» / под ред. Л.М. Зеленого, Б.М. Шустова. 2019. С. 33–51.

## References

1. ESA's Annual Space Environment Report. ESA Space Debris Office, Darmstadt: 27 May 2021, 106 p.
2. Tan G.D., Badhwar F.A. Allahdadi & D.F. Medina. Analysis of the Solwind fragmentation event using theory and computations. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1996, vol. 33, Iss. 1, P. 79–85.
3. Kasper R.L., Young N.A. Delta 180 Collision and Fragmentation Analysis. Xontech (July 1987).
4. Klyushnikov V.Yu. (2018) *Industrializatsiya kak strategicheskaya paradigma osvoeniya i ispol'zovaniya kosmicheskogo prostranstva* [Industrialization as a strategic paradigm for the development and use of outer space] *Vozdushno-kosmicheskaya sfera* [Aerospace sphere]. No. 2 (95). P. 14–21.
5. Klyushnikov V.Yu. (2019) *Kak ochistit' okolozemnoe prostranstvo ot kosmicheskogo musora (KM)* [How to clean the near-Earth space from space debris (SD)] *Vozdushno-kosmicheskaya sfera* [Aerospace sphere]. No. 1 (98). P. 96–107.
6. Veniaminov S.S., Klyushnikov V.Yu., Loginov S.S. (2019) *Obzor metodov protivodeystviya tekhnogennomu zasoreniyu okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva i ego snizheniya* [Review of methods to counter technogenic contamination of near-Earth space and reduce it] *V sb.: Kosmicheskiy musor: fundamental'nye i prakticheskie aspekty ugrozy*. Ser. «*Mekhanika, upravlenie i informatika*». Pod red. L.M. Zelenogo, B.M. Shustova [Space debris: fundamental and practical aspects of the threat. Ser. «Mechanics, control and computer science». Ed. L.M. Zeleny, B.M. Shustova]. P. 33–51.