

УДК 523.68:519.2

## РЕТРОСПЕКТИВА ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА. ЧАСТЬ 1. ТЕХНОГЕННОЕ ЗАСОРЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И СРЕДСТВА ЕГО КОНТРОЛЯ

© 2020 г. В. В. Миронов<sup>1, \*</sup>, И. В. Усовик<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань, Россия

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Долгопрудный, Россия

\**mironov Ivv@mail.ru*

\*\**usovikiv@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2019 г.

После доработки 17.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

В работе проведен обзор последних журнальных и книжных публикаций по проблемам техногенного засорения околоземного космического пространства и методам их разрешения. По итогам публикаций в обзоре анализируются международные стандарты, приводится классификация космического мусора, анализируются основные источники образования космического мусора и методы очищения пространства от мусора, дается оценка эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит, реализация процесса удаления космического мусора. Проанализированы работы по моделированию космических технических систем, предназначенных для регистрации и оценивания потоков космического мусора на орбитах космических аппаратов.

DOI: 10.31857/S0023420620020089

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Техногенное засорение околоземного космического пространства (ОКП) является существенным негативным последствием его освоения и использования. Дальнейшее освоение ОКП невозможно без объективного анализа текущего состояния засорения, закономерностей его эволюции и источников образования. Особенно остро этот вопрос стоит по отношению к области низких околоземных орбит (НОО) с высотами до 2000 км, для которой техногенное засорение является максимальным, и возникла реальная опасность взаимных столкновений КО, включая КМ [1].

Космический мусор — это все находящиеся на околоземной орбите космические объекты искусственного происхождения (включая фрагменты или части таких объектов), которые закончили свое активное функционирование [1–5].

Проблему КМ обозначили еще в 80-х гг., однако серьезное внимание она получила позднее, с созданием в 1993 г. Межагентского координационного комитета по космическому мусору (МККМ), а также с включением в 1994 г. проблемы космического мусора отдельным пунктом в повестку Научно-технического подкомитета (НТПК) комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях.

Ограниченные рамками журнальной статьи авторы, в силу своих профессиональных интересов и профессиональной принадлежности, проанализировали проблему космического мусора в одном из возможных направлений. Детализация или фрагментация проблемы возможна и необходима. В этом контексте авторы анонсируют продолжение анализа публикаций по проблеме космического мусора в разрабатываемом ими направлении. Одновременно в заключительной части работы авторы предлагают короткий обзор “альтернативного” взгляда на проблему космического мусора.

### 2. АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, СОЗДАВАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ ПРОБЛЕМ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ

В настоящее время области ОКП определены следующим образом [1–7]: — область низких околоземных орбит: область ОКП, ограниченная высотой 2000 км (например, круговая орбита с периодом обращения 127 мин); — область средневысоких околоземных орбит (СВО): область ОКП ограниченная высотами от 2000 до 35 586 км; — область геостационарной (геосинхронной) орбиты (ГСО) представляет собой торообразную фигуру, огра-

ниченную по высоте  $35786 \pm 200$  км и наклонению  $0 \pm 15$  град.

В 1999 г. Научно-техническим подкомитетом Комитета ООН по космосу был опубликован “Технический доклад о космическом мусоре” [7], после чего Межагентский координационный комитет по космическому мусору (МКММ) включил в свою повестку вопрос о разработке международных руководящих принципов по предупреждению образования космического мусора. В 2002 г. был принят документ “Руководящие принципы МКММ по предупреждению образования космического мусора” [3], который регулярно редактируется и обновляется на основе последних исследований. В этом документе были определены две защищаемых области в ОКП: НОО и ГСО.

Относительно этих защищаемых областей “Руководящие принципы МКММ...” гласят, что “любая деятельность человека в космосе должна проводиться с учетом уникальности защищаемых областей НОО и ГСО таким образом, чтобы гарантировать их безопасное и непрерывное использование в будущем. Эти области должны быть защищены в отношении образования космического мусора” [3].

В дополнение к “уникальному” статусу, эти две области оказались также наиболее востребованными для формирования целевых орбит большинства КА, следовательно, сохранение возможности дальнейшего использования этих двух областей ОКП необходимо всем будущим поколениям. Одним из вопросов, рассматриваемых “Руководящими принципами МКММ...”, является удаление КА по завершении их активного функционирования из зоны рабочих орбит. Чтобы снизить образование нового КМ в защищаемых областях вследствие их случайных столкновений, рекомендовано не допускать длительного пребывания нефункционирующих КА и ступеней ракетносителей (РН) в областях НОО и ГСО. Рекомендация для области НОО относится не только к объектам, которые находятся там постоянно, но и к объектам, которые регулярно пересекают этот район, то есть находятся на эллиптических орбитах. “Руководящие принципы МКММ...” требуют, чтобы космические системы (КС), находящиеся в области НОО по завершении их активного функционирования, были переведены на более низкие орбиты со сроком орбитального существования не более 25 лет, а КС, находящиеся в области ГСО, должны уводиться по завершении их активного функционирования на орбиту выше области ГСО. Области пространства между НОО и ГСО, т.е. область СВО, и выше области ГСО сознательно не определялись как защищаемые области. Однако “Руководящие принципы МКММ...” предлагают для них следующую рекомендацию: “По завершении целевого функционирования в заданной об-

ласти орбит (кроме НОО и ГСО) КС должны выполнить маневр “увода” для уменьшения времени орбитального существования, по аналогии с ограничениями для НОО, или должны переводиться на другие орбиты, если они представляют опасность с точки зрения взаимных столкновений в активно используемых областях орбит” [3].

В 2008 г. были приняты “Руководящие принципы Комитета ООН по космосу по предупреждению образования космического мусора” [4]. Данный документ согласован с “Руководящими принципами МКММ...”, однако содержит больше общих требований, рекомендует государствам — членам ООН и международным организациям добровольно применять, через свои национальные и иные механизмы, меры по ограничению образования КМ. Рекомендуется их использовать при проектировании и эксплуатации вновь разрабатываемых КС. Данные принципы не являются юридически обязательными согласно международному праву.

Большая работа по разработке международных стандартов в части КМ ведется в Международной организации по стандартизации [2, 8].

В России разработан ГОСТ Р 52925-2008 [5] “Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства”, в котором представляются гармонизированные с международными рекомендациями требования к КС в части ограничения техногенного засорения.

Классификация КМ согласно “Руководящим принципам МКММ...” [3], а также меры предотвращения образования различных групп КМ представлены в [3], а более подробная классификация техногенных КО в ОКП представлена в [6].

Характерной особенностью всей деятельности по освоению и использованию ОКП является его засорение объектами искусственного происхождения. Число запусков КА составляет в среднем около 100 в год, однако в последнее время происходит увеличение количества запусков большого количества малых КА в область НОО, за один запуск выводится более 10 малых КА. Вес ежегодно выводимых на орбиты объектов составляет примерно 160 тонн. В результате запусков новых КО, выполнения разного рода технологических операций на функционирующих КА, вследствие взрывов и аварий ежегодно образуется 600–700 объектов размером более 10 см [9].

В [10] представлены зависимости количества объектов и количество запусков РН по данным американской сети контроля космического пространства. Из анализа работы видно, что количество КМ увеличивается, особенно следует отметить резкое изменение количества объектов в 2007 и 2009 гг., что связано с разрушением спутника *Fengyun-1C* и столкновением КА *Iridium-33*

и *Космос-2251*. До 1990 г. в среднем проходило около 110 пусков космических РН в год, после 1990 г. происходило около 80 пусков космических РН в год. В настоящее время наблюдается тенденция увеличения количества пусков.

На сегодня общая масса объектов в ОКП оценивается приблизительно в 7400 тонн [11]. В области НОО располагается 77% от общего числа каталогизированных объектов, в области ГСО сосредоточено 6% каталогизированных объектов, приблизительно 14% – в области высокоэллиптических орбит (ВЭО) и 3% – на других орбитах, в том числе в области навигационных спутниковых систем. По своему составу каталогизированные объекты включают 24% КА, из которых активно функционируют только 8%; 11% составляют ступени РН и РБ; 5% – операционные элементы, образовавшиеся в процессе выведения КА на рабочие орбиты.

Основная часть каталогизированных космических объектов (60%) является продуктами разрушения КА, РН, РБ [1, 10]. Здесь же представлено расположение всех каталогизированных объектов в один момент времени в инерциальной системе координат, а также представлена зависимость концентрации каталогизированных объектов от высоты. Как видно из анализа данных, имеется 1 локальный максимум в области НОО и 3 локальных максимума в области ГСО и в области полета навигационных спутниковых систем на СВО.

Основными источниками образования КМ в настоящее время являются случаи фрагментации на орбите вследствие случайных или преднамеренных взрывов, случайных или преднамеренных столкновений. Произошло более 250 событий разрушения КО на орбите, случайным образом или инициированных преднамеренно.

Случаем непреднамеренного взрыва, создавшего большое количество объектов, до сих пор находящихся на орбите, был взрыв советского космического аппарата *Космос-1275*. Взрыв батареи спутника привел к возникновению 259 объектов, которые отслеживаются до сих пор, т.е. более чем через 25 лет. В результате разрушения ступени *Nimbus-4* образовалось более 370 наблюдаемых объектов, причем 240 элементов мусора находятся на орбите на протяжении более чем 35 лет [12].

Подробная история катастрофических случаев фрагментации КО до 2007 г. представлена в отчетах NASA [10, 13]. В этих отчетах представлено количество катастрофических событий в разные годы, начиная с 1961 г., и распределение их по причине происхождения. Из анализа данных следует, что за последнее десятилетие произошел значительный скачок засоренности, связанный с двумя катастрофическими событиями, описанными выше, а именно: 1) преднамеренное разрушение китайского спутника *Fengyun-1C* 11.1.2007, в результате которого каталогизировано более 3000 фрагментов КМ;

2) столкновение американского действующего спутника связи *Iridium-33* и российского неактивного КА *Космос-2251* 10.11.2009 на высоте около 780 км, в результате каталогизировано более 2000 фрагментов КМ. В результате этих двух событий техногенная засоренность ОКП в области НОО увеличилась на 40%.

Информация о некоторых известных до настоящего времени столкновениях представлена в работе [14].

Одним из последних зафиксированных столкновений является достоверно подтвержденное в сентябре 2016 г. ESA столкновение КА *Sentinel-1A* с некаталогизированным КМ (0.5–1 см), что было детектировано бортовой камерой и по данным телеметрической информации [15]. В середине января 2013 г. произошла авария КА *Блиц*. По данным оценок отечественных и зарубежных специалистов [9], наиболее вероятной причиной аварии КА *Блиц* является его столкновение с мелким фрагментом космического мусора массой  $\approx 0.035$  г и размером менее 2.5–5.0 мм.

С точки зрения наблюдаемости все объекты КМ можно разделить на 2 большие группы [16]: наблюдаемые и ненаблюдаемые объекты КМ. Наблюдаемые объекты КМ представляют собой объекты с поперечным сечением более 5–30 см (в зависимости от характеристик наблюдаемого объекта и орбиты), которые постоянно или периодически сопровождаются средствами наблюдения. Для этих объектов известны параметры их орбит, эффективная поверхность рассеяния, блеск и другие характеристики, измерение которых производится с использованием радиолокационных станций и оптических телескопов. К данной группе объектов относятся отработавшие КА, РН, РБ, объекты КМ, образовавшиеся в результате выведения на орбиту и активного функционирования КА, фрагменты взрывов и разрушений КА, РН и РБ. К категории ненаблюдаемых относятся объекты, образовавшиеся в результате взрывов и взаимных столкновений КО, а также продукты горения топлива, старения и деградации поверхностей.

Современные средства наблюдения постоянно совершенствуются, и нижняя граница размеров наблюдаемых КО уменьшается, но является размытой в связи со сложностью каталогизации объектов малого размера, лишь малая часть таких объектов каталогизирована в настоящее время [1]. В работе [7] представлены обобщенные данные об измерениях КМ разных размеров. Показаны области, где были проведены измерения. Характерной особенностью этих данных является монотонный рост числа объектов по мере уменьшения их размеров. Видно, что в многомерной области “высота – размеры КМ” измерения объектов размером менее  $\approx 5$  см были проведены только в относительно небольших локальных регионах. Это об-

стоятельность характеризует основную трудность достоверной оценки пространственно-временного распределения мелкого КМ. Из приводимых данных видно также, что поток частиц размером более 1 см превышает поток метеороидов. В диапазоне размеров от 1 мм до 1 см эти потоки соизмеримы. При размерах частиц менее 1 мм преобладает поток микрометеороидов. В настоящее время ситуация резко ухудшилась [11].

Для оценки техногенного засорения ненаблюдаемым КМ используются модели, построенные на основании имеющейся экспериментальной информации [11], где представлены расчетные значения удельного потока КМ размером больше заданного для орбиты *МКС* и солнечно-синхронной орбиты с высотой около 840 км, полученные с использованием последних на начало 2015 г. версий трех признанных моделей космического мусора: модель *NASA ORDEM 3.0*, модель *EKA MASTER 2009*, отечественная модель *А.И. Назаренко SDPA* [17].

Из приводимых данных видно, что различия оценок по разным моделям являются весьма существенными. Особенно это касается оценок потока частиц размером менее 1 см. Для КМ размером более 1 мм отличия достигают 1–2 порядков. Данный факт свидетельствует о том, что в диапазоне размеров от 1 мм до 1 см нет экспериментальных данных, достаточных для уточнения моделей КМ с приемлемой точностью. Сравнение данных моделей 2015 г. с измерительными данными, полученными ранее, показывает, что техногенное засорение объектами размером менее 10 см увеличилось на порядок.

В [11, 18] проанализированы история и состояние техногенного засорения ОКП. В [11, 19] рассмотрены проблемы (угрозы), связанные с КМ, и методы их решения. Первой проблемой является возможность взаимных столкновений, приводящая к полной или частичной потере функций действующих КА, а также к образованию новых фрагментов КМ. Вторая проблема — это угроза падения не сгоревших в атмосфере объектов на Землю. Третьей проблемой является создание помех для средств наблюдения, что может приводить к получению искаженной информации, а также возможности появления ложных целей. Решение проблем КМ связано с тремя взаимосвязанными задачами: предупреждение об опасных ситуациях, защита КА от КМ, ограничение и снижение техногенного засорения. Более подробно методы их решения рассмотрены в [11].

Исследование выполнения мер по ограничению техногенного засорения согласно “Руководящим принципам МККМ...” было проведено Европейским [20] и Французским космическими агентствами [21]. На интервале 2000–2012 гг. с использованием базы данных *USSSTRATCOM* был

проведен анализ всех запущенных КА и РН на соответствие требованиям ограничения техногенного засорения, в части их увода по окончании функционирования на орбиты со сроком существования не более 25 лет. В [11] представлены результаты данного исследования для КА, РБ и ступеней РН. Как видно из представленных там гистограмм на исследуемом интервале времени около 39% запускаемых КА, РБ и ступеней РН не соответствуют мерам по ограничении техногенного засорения. Причинами данного несоответствия является отсутствие на запускаемых изделиях РКТ специальных устройств увода по окончании функционирования, вследствие чего 39% из запускаемых объектов будут оставаться на орбитах более 25 лет.

Последние исследования в области оценки долговременной эволюции КМ говорят о недостаточности применения данных мер в долгосрочной перспективе [9, 22–28], потому что текущее состояние техногенного засорения достигло уровня, когда взаимные столкновения могут инициировать процесс саморазмножения космического мусора, широко известный как “синдром Кесслера”, даже с учетом реализации всех мер по ограничению техногенного засорения. Поэтому многие специалисты во всем мире приходят к выводу о необходимости “очистки” околоземного космического пространства. При этом наиболее целесообразным для исследования представляется КМ размером более 10 см, т.к. операции активного удаления будут направлены на увод крупных объектов КМ, что в перспективе позволит предотвратить их возможные столкновения с другими объектами и, как следствие, образование более мелкого КМ.

Теоретические исследования по методам “принудительного” увода нефункционирующих объектов из ОКП в разных странах ведутся более десяти лет. В настоящее время на крупнейших симпозиумах по вопросам КМ главной задачей ближайшего будущего называют задачу его активного удаления. Однако в настоящее время нет достаточного обоснования применения конкретных методов удаления и оценки влияния применения данных методов на долгосрочную эволюцию КМ. Рассмотрим предлагаемые на данный момент методы активного удаления КМ [2].

Следует разделить все методы активного удаления на две большие группы по возможности наблюдения размеров удаляемых объектов: методы удаления крупных объектов (>10 см) и удаления мелких объектов КМ (<10 см). В работах [27, 28] дается обоснование необходимости удаления в ближайшем будущем крупных объектов, что является реализуемой задачей и более эффективной с точки зрения снижения техногенного засорения.

На сегодняшний день все способы очистки космического пространства от объектов КМ можно условно разделить на три большие группы: — торможение объектов космического мусора с низким перигеем орбиты, с последующим сгоранием КМ в атмосфере Земли или падением в малонаселенных районах; — разгон или изменение направления вектора скорости КМ на орбитах с высоким перигеем, для увода его на орбиту захоронения; — уничтожение или дробление КМ различными техническими средствами (в случае незасорения ОКП). Для задействования той или иной программы необходимо оценить объемы КМ в исследуемой части ОКП, для чего предусмотрены различные технические и системы [11, 29–31].

Анализ показывает, что можно выделить два концептуально различающихся метода удаления крупных объектов КМ: использование сервисных КА (СКА) для непосредственного удаления КМ или присоединения к ним специальных устройств, решающих эту задачу; использование наземных лазеров или аналогичных систем для дистанционной передачи энергии объектам с целью их удаления [1].

Возможно, наиболее детальным исследованием наземного лазера, который может быть использован для очистки космической среды, был проект ORION [29], возглавлявшийся НАСА и разработанный для оценки технических и эксплуатационных требований такой системы. Цель состояла в том, чтобы понизить перигей каждого фрагмента мусора до 200 км или ниже, чтобы гарантировать быстрый вход в атмосферу. Консервативная стоимостная оценка при максимальном использовании существующей инфраструктуры — 100 миллионов долларов в ценах 1995 г. По результатам исследований был сделан вывод о технической и экономической неэффективности в настоящее время такой системы. В настоящее время ведутся работы по исследованию подобного рода способов удаления КМ.

При удалении большого объекта с использованием СКА предполагается близкое сближение и использование сложных методов захвата больших объектов: сеть, надувной лонжерон, закрепленный гарпун, соединительный трос/лассо, электростатическое/клейкое покрытие, также возможны и бесстыковочные методы воздействия на объект для его удаления. Процедура усложняется, если объект вращается или имеет на борту энергоемкие материалы. Исследования показали, что наличие вращения — главное препятствие при удалении крупно-размерного КМ [1]. Это особенно большая проблема для удаления геостационарных спутников, так как многие из этих спутников стабилизированы вращением. Чтобы остановить вращение геостационарного спутника с двойным вращением, потребуется только 0.36 кг топлива при использо-

вании двигателя с удельным импульсом 300 с. Однако в области НОО большинство объектов имеет небольшой угловой момент из-за комбинации внутренних импульсных устройств, стабилизации градиента гравитации и аэродинамических вращающих моментов. Другая особенность систем, предназначенных для активного удаления, — большие требования по энергии и топливу. Чтобы максимизировать эффективность, системы должны удалять несколько объектов за каждый полет. Поэтому, в отличие от большинства КА, которые нужно только вывести на орбиту, орбитальные системы удаления мусора должны не только маневрировать между несколькими объектами мусора, но и передать каждому объекту для схода с орбиты или перемещения. Поэтому, назначая группы целевых объектов в узком диапазоне высот и наклонений, было бы очень полезным минимизировать количество маневров между объектами.

Максимальный уровень проработки имеют проекты очистки от мусора низких орбит, что связано, во-первых, со сравнительной простотой их реализации, а во-вторых, с необходимостью решать проблему защиты от КМ *МКС*. В общем случае в существующих проектах объекты КМ тормозятся в искусственно созданных зонах с высокой плотностью вещества или силового поля (газовые или пылевые облака, магнитные или электростатические поля) либо улавливаются “мусоросборщиками”, выполненными в виде СКА, оборудованных специальными устройствами.

Преимуществом таких проектов является простота их технической реализации (использование пассивных, неуправляемых средств воздействия на объекты КМ), а также дешевизна, определяемая небольшой высотой целевой орбиты и, следовательно, возможностью использования ракетносителей легкого и среднего классов. Также малая высота орбиты позволяет для создания СКА использовать платформу CubeSat.

Уничтожение или дробление объектов космического мусора, несмотря на внешнюю привлекательность с точки зрения возможности многоразового применения, имеет два существенных недостатка: невозможность абсолютного уничтожения при использовании механических средств воздействия на КМ и потребность в высокой энергооборуженности сервисного КА при использовании энергетических средств воздействия на КМ. Несмотря на то, что тенденции развития спутнико-строения последних лет показали принципиальную возможность создания КА с мощностью солнечных батарей в сто киловатт и выше, а также успешные испытания боевых лазеров, целесообразность в уничтожении объектов КМ не очевидна и эта задача требует дополнительных исследований, направленных в первую очередь на оценку вероят-

ности и величины вторичного засорения орбиты продуктами распада уничтожаемых объектов КМ.

Перспективными направлениями исследований по созданию методов и средств удаления крупноразмерных объектов КМ с использованием КА орбитального обслуживания (сервисных КА) являются следующие:

1) создание средств стыковки сервисных КА с не кооперируемыми КО и функционирующими изделиями РКТ для проведения операций увода;

2) разработка сервисных КА для закрепления на целевых объектах КМ автономных тормозящих систем, точнее: – устройства повышения сопротивления КМ при его движении в верхней атмосфере в области НОО; – электродинамические тросы – проводящие тросы длиной несколько километров, прикрепляемые к удаляемому объекту КМ; – солнечные паруса – прикрепляются к КМ и за счет давления солнечного излучения обеспечивают его увод с орбиты; – модули в составе двигателя и системы управления, которые прикрепляются к крупному КМ и обеспечивают его торможение;

3) разработка сервисных КА для дистанционного воздействия на целевые объекты КМ, точнее: – использование бортовых лазеров для создания механического импульса, действующего на КМ, за счет эффекта абляции; – использование ионных пучков для создания механического импульса, действующего на КМ; 4) создание с помощью сервисных КА “ловушек” (большие многослойные сферы, заполненные пеной сотовой структуры и др.) для торможения и сбора мелкодисперсной фракции КМ в районах ее наибольшего скопления [11].

Из предлагаемых технических решений наиболее реально в ближайшей перспективе создание сервисных КА, оснащенных средствами стыковки и увода крупногабаритных объектов КМ. Первый и частично отработанный метод “стыковки” сервисного КА с мусором основан на использовании роботизированного манипулятора. Подобные системы используются на *Space Shuttle* и *МКС* для стыковки с различными объектами. Следует отметить, что с использованием таких манипуляторов *Space Shuttle* совершил как минимум 2 операции удаления объектов из космоса по программам *Hubble* и *LDEF* [1], поэтому применение данной технологии является перспективным.

Другим методом стыковки может быть использование системы захвата в виде сети, выбрасываемой на расстояние, исключающее столкновение сервисного и обслуживаемого КА. Возможность безопасного захвата спутника-цели с использованием такого способа при различной динамике КА-цели, разных формах и размерах целевых спутников нуждается в доказательстве. К положительным сторонам можно отнести достаточно большие ди-

станции стыковки, к отрицательным сторонам относится сложная динамика взаимного движения, отсутствие опыта применения, возможность обрыва троса.

Следующий метод стыковки – использование гарпуна, с помощью которого происходит стыковка с объектом удаления. К положительным сторонам данного метода можно отнести реализуемость, к отрицательным – возможное образование мелких фрагментов КМ при стыковке с КМ.

Одним из перспективных методов является дистанционное воздействие на удаляемый объект с использованием системы инъекции пучка ионов.

Данный метод предполагает использование электроракетной двигательной установки для увода КМ. Высокоскоростной ионный пучок генерируется на борту сервисного КА в непосредственной близости от КА-цели. Ионы ускоряются в двигательной установке КА или ионной пушке до 30 км/с и более. Пучок ускоренной квазинейтральной плазмы, попадая на поверхность КА-цели, воздействует на него с некоторой силой, величина которой существенно зависит от угла расходимости ионного пучка, распыления атомов на поверхности КА-цели, отклонения оси пучка от центра тяжести КА-цели и т.д. Величина расходимости пучка и возможные его отклонения накладывают ограничения на максимальное расстояние между КА и транспортируемым объектом.

Такая модель изменения орбиты КМ обладает следующими преимуществами:

1) воздействие может быть осуществлено вне зависимости от того, вращается ли КА, цель и какую форму имеет;

2) нет необходимости в разработке специальных захватывающих устройств [41].

Рассмотренные выше методы предназначены для удаления крупного орбитального мусора. В этой категории для удаления предназначались бы самые большие и тяжелые объекты. Основная причина – эффективность. Если удалить данные объекты, то предотвращается образование большего количества среднего и мелкого КМ. Кроме того, большие объекты было бы легче сопроводить и легче захватывать.

### 3. ОЦЕНКА ЭВОЛЮЦИИ ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНОГО УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

В рамках работ Межагентского координационного комитета по космическому мусору в 2013 г. [32] была утверждена работа по оценке эффективности влияния активного удаления космического мусора на состояние техногенного засорения в области НОО, в которой принимает участие 9 космических агентств. Основной целью

исследования является количественная оценка использования активного удаления КМ для управления будущим состоянием техногенного засорения в области НОО и разработка технических основ для обоснования требований по активному удалению КМ [33–36]. В рамках данной работы были утверждены основные исходные данные. Используются 12 сценариев, в каждом учитываются регулярные запуски новых объектов. Из них 3 сценария без активного удаления, в которых учитываются меры по ограничению техногенного засорения, – соответствие 30, 60 или 90% из запущенных объектов “правилу 25 лет” (новые запускаемые объекты либо должны быть уведены из области НОО сразу по окончании функционирования, либо должны быть переведены на орбиты со сроком орбитального существования не более 25 лет). Для оценки влияния активного удаления КМ (на английском Active Debris Removal (ADR)) разработаны 9 сценариев, в которых помимо мер по ограничению учитывают одно из 3 значений количества уводимых в год объектов: 2, 5, 8 объектов в год с наибольшим значением произведения массы объекта на вероятность столкновения.

Базовый сценарий включает в себя следующие положения: 1) исходные данные о количестве объектов размером более 10 см представлены Европейским космическим агентством (ЕКА) на 1.1.2013; 2) запуски новых объектов дублируют 8-летний цикл запусков с 1.1.2005 по 1.1.2013, который повторяется циклически при прогнозе; данные об объектах представлены ЕКА; 3) для новых запущенных КА задано время функционирования – 8 лет; 4) 30, 60, 90% из новых запускаемых объектов соответствуют правилу 25 лет; 5) взрывов не происходит; 6) маневры уклонения от столкновений не производятся; 7) в столкновениях участвуют все объекты размером более 10 см; 8) за исключением положений, описанных в сценарии, могут применяться любые модели, которые будут сочтены нужными; 9) прогноз осуществляется на 200 лет.

Исходя из анализа публикаций и предлагаемых решений можно расписать “сценарий” активного удаления КМ: 1. активное удаление КМ начинается с 2025 г.; 2. критерий выбора объектов для удаления: а) исключаются функционирующие КА; б) исключаются объекты с высотой перигея более 2000 км; в) исключаются объекты со значением эксцентриситета более 0.5; г) исключаются фрагменты; д) исключаются РБ и КА со сроком орбитального существования менее 25 лет; е) выбираются объекты с максимальным значением произведения массы на вероятность столкновения; г) удаляются 2, 5, 8 объектов.

Всего с учетом изложенных выше положений рассматривается 12 сценариев:

– без удаления 30; 60; 90% PMD;

– с удалением: 2 объекта + 30; 60; 90% PMD;

5 объектов + 30; 60; 90% PMD;

8 объектов + 30; 60; 90% PMD.

На основании данных [11] можно сделать следующие выводы: около 15% объектов располагается на сильно эллиптических орбитах, по высоте перигея существует два максимума по количеству объектов: глобальный максимум на высотах 700–800 км и локальный максимум 1400–1500 км, в распределении наклонений 5 локальных максимумов и глобальный в окрестности наклонения 98 град, распределение объектов по высоте и баллистическому коэффициенту имеет глобальный максимум для высот 700–900 км и значения баллистического коэффициента  $2.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{кг}$ .

В качестве результатов моделирования, согласно мировой практике решения данной задачи, выступают: зависимость количества объектов размером более 10 см по годам на интервале прогнозирования с разбиением его по типам объектов (все, текущий КМ, РБ + РН + ОЭ, новый КМ) и оценкой среднеквадратического отклонения (СКО) суммарного количества объектов, оценка концентрации КМ по высоте для разных моментов времени, оценка суммарного количества взаимных столкновений, произошедших к заданному году, оценка районов взаимных столкновений, оценка областей увода КМ из НОО. Общие сведения о методиках моделирования изложены в [9, 16, 36–38].

В работе [11] рассмотрены результаты оценки для наихудшего и наилучшего сценариев. Под наихудшим сценарием понимается сценарий без активного удаления, с соблюдением рекомендаций по ограничению техногенного засорения (PMD) на 30%. Представлены зависимости количества объектов разного типа по годам, зависимость концентрации и оценка количества столкновений. Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы: в краткосрочной перспективе количество объектов будет оставаться примерно на постоянном уровне, что связано со сгоранием старых объектов КМ и слабой интенсивностью образования новых объектов вследствие столкновений. В среднесрочной перспективе количество объектов будет монотонно увеличиваться, а в долгосрочной перспективе наблюдается ярко выраженное увеличение количества нового КМ, вызванного столкновениями. Количество КА + РБ + ОЭ увеличивается на протяжении всего интервала прогноза. Серой пунктирной линией на графике представлена оценка СКО, полученная на основе оценки СКО количества образующихся в результате столкновений объектов. Короткопериодические изменения связаны с 11-летним циклом солнечной активности.

В [11] представлена зависимость концентрации КМ в 2013, 2113 и 2213 гг. Из анализа видно, что в первое столетие количество объектов в об-

ласти высот до 700 км уменьшится, а для области высот более 700 км увеличится, с учетом оценки СКО можно сделать вывод, что количество объектов через 100 лет будет не меньше, чем в настоящее время. На интервале 2113–2213 гг. произойдет резкое увеличение количества космических объектов, на конец прогноза оцененное среднее максимальное значение концентрации в 2.5 раза больше текущего уровня. Представлена зависимость изменения суммарного количества столкновений, произошедших к данному году. Видно, что до 2125 г. количество столкновений увеличивается линейно, а после идет увеличение количества столкновений по степенному закону. Представлено распределение количества столкновений по высоте. Как видно из этого графика, наибольшее количество столкновений произойдет в диапазоне высот 700–900 км. Второй локальный максимум располагается в области 1400–1500 км.

На основании полученных результатов для худшего сценария можно сделать следующий вывод: в долгосрочной перспективе, при сохранении интенсивности запусков на уровне 2005–2012 гг. и соблюдении “правила 25 лет” для 30% запускаемых объектов, произойдет существенное увеличение засоренности области НОО объектами с размером более 10 см вследствие большого количества столкновений.

В [11] рассмотрен и наилучший сценарий, учитывающий удаление 8 крупных объектов в год с 2025 г. по заданному критерию (произведение массы на вероятность столкновения) и соблюдение рекомендаций по ограничению техногенного засорения (PMD) на 90%. Из анализа видно, что при данном сценарии наблюдаются снижение и стабилизация количества объектов при прогнозе. Интенсивность образования нового КМ вследствие столкновений невысокая, концентрация объектов по сравнению с 2013 г. уменьшится и стабилизируется, видны слабая интенсивность взаимных столкновений и их практически линейное увеличение.

В процессе моделирования с 2025 г. удалялось по 8 объектов из подмножества ADR. В расчетах использовался критерий удаления в виде произведения  $M_i S_i Q_i$ , где  $M_i$  – масса объекта,  $S_i$  – площадь объекта,  $Q_i$  – поток космического мусора для орбиты объекта. Произведение  $S_i Q_i$  характеризует количество столкновений объекта на заданном интервале времени и является аналогом вероятности столкновения. Орбитальные параметры каждого удаляемого объекта сохранялись в отдельный массив данных. На основании этих данных были получены зависимости областей для активного удаления КМ. В основном данные объекты располагаются на околокруговых орбитах, поэтому для данных областей были построены распределения по высоте перигея и наклонению.

Как видно из результатов проведенного исследования, при данном сценарии объекты удалялись из нескольких областей, при этом наибольшее количество удалялось из области высот 950 км и наклонений  $82^\circ$ . Оценка активного удаления и областей для увода будет представлена далее.

Рассмотрим результаты прогноза. В [11] представлены зависимости количества объектов, количества столкновений и концентрации для всех сценариев. Как видно из анализа, изменение количества объектов и количества столкновений в долгосрочной перспективе существенно зависит от принимаемых мер по ограничению техногенного засорения и количества удаляемых объектов.

В случаях выполнения “правила 25 лет” на 30 и 60% активное удаление даст эффект, но не поможет стабилизировать техногенное засорение. Выполнение “правила 25 лет” на уровне 90% и удаление 2 объектов в год позволит сохранить уровень техногенного засорения в долгосрочной перспективе, удаление 5 и более объектов позволит снизить и стабилизировать уровень техногенного засорения в долгосрочной перспективе.

Статистика показывает [11], что в настоящее время наблюдается уровень соблюдения “правила 25 лет” около 60%. Если данный показатель не будет иметь тенденцию к увеличению, то техногенное засорение низких околоземных орбит будет продолжать увеличиваться.

В каждом расчете, с учетом активного удаления, сохранялась информация об удаляемых объектах на всем интервале моделирования. С использованием этих данных построены зависимости количества удаляемых объектов и их суммарной массы от высоты перигея и наклонения. Распределения по эксцентриситету не строились, т.к. все объекты располагаются на околокруговых орбитах. Данный факт следует из того, что объекты на высокоэллиптических орбитах малую долю времени находятся в области НОО и вероятность их столкновения мала, объекты из множества ADR в основном с малыми значениями эксцентриситета.

На основании результатов расчета по исследуемым сценариям можно выделить 3 области по высотам и наклонениям, для которых активное удаление наиболее актуально в настоящее время:

- 1)  $h = 800–850$  км,  $i = 71.250$ ;
- 2)  $h = 650–800$  км,  $i = 98.750$ ;
- 3)  $h = 900–950$  км,  $i = 83.750$ .

Данный факт следует из нескольких причин: для всех исследуемых сценариев удаление из данных областей проводилось в первые годы реализации операций активного удаления, потому что на данных высотах и наклонениях располагаются самые массивные и тяжелые объекты, для данных орбит значения потока космического мусора и вероятности столкновения являются максимальными.



ми, суммарно по всем сценариям из данных областей удаляется наибольшее количество объектов.

Далее рассмотрим результаты сравнения применения разработанной методики и программного обеспечения с зарубежными аналогами. Рассмотрим сценарий с наилучшим выполнением мер по ограничению техногенного засорения. В [11] представлены оценки количества объектов, полученные с использованием разработанного программного комплекса, и оценки NASA.

Как видно из сравнения результатов с данными NASA, наблюдается хорошее соответствие. Некоторое отличие результатов может быть вызвано использованием при оценках NASA более ранних данных о популяции космических объектов в области НОО. Результаты показывают, что в случае соблюдения мер по ограничению техногенного засорения оно (засорение) будет продолжать увеличиваться.

Рассмотрим сценарии с наилучшими показателями соблюдения мер по ограничению техногенного засорения и с различным количеством вводимых объектов. Представлены результаты оценки, полученные с использованием разработанной методики и специалистами Космического агентства Соединенного Королевства (UKSA).

В целом результаты сходятся к примерно одинаковым значениям, однако среднее прогнозируемое количество объектов по времени отличается. Результаты UKSA имеют выпуклый вид, что может быть связано с большей интенсивностью столкновений и используемой моделью последствий столкновений.

Расчеты по модели SDPA проведены для двух граничных сценариев: с пусками на прежнем уровне и без пусков [11].

Как видно, результаты, полученные по исследуемым сценариям, находятся в промежутке между результатами граничных сценариев по модели SDPA.

Представлены графики областей по высоте и наклонению, в которых наиболее актуально активное удаление, полученные по результатам исследования и специалистами NASA на основании обработки имеющейся информации [28]. Данные результаты получены с использованием критерия производства массы на вероятность столкновения. Как видно, полученные результаты соответствуют исследованиям NASA.

Как видно из представленного выше сравнения, полученные результаты соответствуют результатам, полученным другими специалистами [11].

В завершении раздела следует отметить, что со времени проведения данного исследования состояние техногенного засорения НОО продолжает ухудшаться, ввиду интенсификации запуска малых КА и возможного развертывания больших

орбитальных группировок. Как следствие, на первый план в настоящее время выходит предотвращение образования нового космического мусора подобными системами, т.к. применение активного удаления для большого количества малых КА на сегодняшнем этапе развития науки и техники не представляется эффективным и возможным.

#### 4. КОСМИЧЕСКИЕ БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Общая проблема. Как уже отмечалось, проблема засорения ближнего космоса частицами естественной и техногенной природы стала весьма актуальной, на ее решение направляются значительные силы и средства. В то же время мелкие частицы мусора диаметром менее 1 см в околоземном пространстве практически не исследованы [39, 40].

В этой связи была поставлена и решена проблема конструирования, создания и математического обеспечения и функционирования бортовых систем сбора данных о мелком мусоре в ОКП, сначала на в модельном режиме, а затем, в реальных системах. В данном обзоре проблема рассмотрена с позиций математического моделирования. Другими словами, описаны модели реальных технических систем на поверхности космических аппаратов (КА), которые регистрируют и оценивают воздействие мусора на КА. Остановимся коротко на этой проблеме, основываясь на работах [31, 41–48]. Программная реализация задачи осуществлена в работах [49–52].

С целью апробирования методики задача вначале решалась и в упрощенном двумерном случае. В ходе решения на основе метода прямоугольных вкладов [53] создана новая методика восстановления плотности космического мусора по малому числу зарегистрированных столкновений точек с датчиками регистрации, “дискретно” покрывающими поверхность КА, причем по виду функции плотности оценим с достаточно высокой точностью и надежностью общее количество точек, достигших КА.

Вообще, разработанная система предусматривает функционирование, как в одиночном полете, так и группой аппаратов. Описывается трехмерная математическая модель и соответствующий ей программный комплекс по моделированию воздействия частиц мелкого космического мусора на КА. Представляется созданная на основе метода прямоугольных вкладов (МПВ) новая методика восстановления плотности мелкого космического мусора по малому числу зарегистрированных столкновений мусора с датчиками регистрации, установленными на борту КА; по виду функции плотности восстанавливается общее количество

осколков, достигших его поверхности. Приводятся сравнительные результаты моделирования.

В работах изучаются располагаемые на поверхности космических аппаратов системы регистрации и оценивания внешнего воздействия частиц естественной и техногенной природы на КА. Эти системы состоят из прямоугольных датчиков регистрации, соединенных жгутами линий связи, которые тянутся в головную часть КА к системам обработки измерительной информации. Для разных систем датчики имеют разную техническую “начинку” и потому отличаются по принципам функционирования.

Провести длительное разностороннее сравнение систем в реальном космическом полете — чрезвычайно дорого. В этой связи проведено компьютерное моделирование работы систем. В основу моделирования работы двух реальных систем СКД (система контактных датчиков) и САД (система активных датчиков) и их сравнения с идеальной, не имеющей реального воплощения системой СКАД (система контактно-активных датчиков), но имеющей все достоинства систем СКД и САД и свободной от их недостатков, заложено соотношение данных (размеры и количество датчиков, способы разлета частиц и т.д.), отражающее реальные эксперименты. Системы СКД и САД сравниваются по их отношению к системе СКАД по шести числовым характеристикам (критериям эффективности), сводимым с известными весами к единому критерию. По проведенным вычислительным экспериментам определяются статистические математические ожидания и дисперсии числовых характеристик, по которым и производится сравнение. Можно считать, что системы СКД и САД являются реальными оценками идеальной системы СКАД. Определим нормы отклонений (точности оценивания) систем СКД и САД от СКАД:

$$\begin{aligned} \|\text{СКД} - \text{СКАД}\| &= C_1, \\ \|\text{САД} - \text{СКАД}\| &= C_2. \end{aligned}$$

Обобщающим критерием для сравнения реальных систем служит т.н. относительная точность “оценивания” — величина  $C = C_2/C_1$  — эффективность системы СКД по отношению к системе САД. С помощью разработанного комплекса программ ДТСНК величина  $C$  рассчитывается для различного числа  $K$  поступающих на КА точек ( $C$  является функцией от  $K$ ). По неравенству  $\min_{K^0} C \leq 1$  гарантированно (по множеству экспериментов) восстанавливается мощность (число элементов) подмножества  $K^0 \subseteq K$ .

К комплексам программ, решающих задачу, были предъявлены специальные требования по надежности, удобству общения, наглядности результатов, структурному программированию и пр.

В основу моделирования работы двух реальных систем: системы контактных датчиков (СКД) и системы активных датчиков (САД) — заложено соотношение данных (размеры и количество датчиков, способы разлета точек и т.д.), отражающее условия реальных экспериментов. Названные СКД и САД сравниваются по их отношению к системе контактно-активных датчиков (СКАД) — идеальной системе, имеющей все достоинства первых двух и свободной от их недостатков — исходя из шести числовых характеристик с известными весами, сводимых к единому обобщающему критерию.

В пределах допустимого идеализируем ситуацию и представим КА в виде цилиндрического тела, на котором одинаковым образом размещены три системы регистрации точек.

По условию системы датчиков расположены только на рабочей части КА, на головной его части датчиков нет. Точки случайным образом поступают на КА (достигают его поверхности), причем под любыми углами и с разных сторон.

При создании модели указанного процесса рассматривалось следующее упрощение реальной ситуации: в зависимости от места соударения точки с датчиком цилиндрическая поверхность КА представлялась состоящей из двух плоских частей (сторон КА), расположенных напротив друг друга. Такое искусственное разделение поверхности аппарата происходит при каждой регистрации точки соответствующей системой регистрации и позволяет учитывать т.н. вторичные точки — “осколки” от первого соударения.

Все три рассматриваемые системы СКД, САД и СКАД состоят из датчиков Д2 (условное имя), имеющих определенную форму и физическую “начинку” и регистрирующих столкновение точки с поверхностью датчика. Датчики соединены жгутами линий связи (условно — датчик Д3). Датчики расположены на одной линии связи согласно некоей утвержденной специалистами схеме. Все системы состоят из четырех жгутов (каналов), последовательно пронумерованных цифрами 1, 2, 3, 4. Под одно воздействие точки на одной стороне КА могут попасть только два соседних канала, т.е. только пары каналов (1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 1).

В программной реализации датчик Д2 — это “прямоугольник” со сторонами  $a, b$ , которые могут варьироваться в известных пределах. Все системы регистрируют точки, попадающие в этот прямоугольник. Датчик Д3 — система проводов от одного датчика Д2 до жгутов от датчика Д2. Часть объекта, на котором нет датчиков Д2, Д3, есть (условно) датчик Д1.

Для того чтобы промоделировать гибкое расположение датчиков Д2 и Д3 на рабочей поверхности КА (реально датчики располагаются несимметрично, жгуты проходят не под прямыми

углами, часть датчиков Д2, Д3 может деформироваться и т.д.), каждый из них разбивался на гипотетические мини-датчики. За счет этих мини-датчиков в программе изменялась конфигурация датчиков Д2, Д3 на рабочей поверхности КА без изменения их площадей при моделировании ситуации. Точка  $A$ , пришедшая на первую сторону рабочей поверхности КА, может “пробить” ее с некоторой заданной вероятностью и разделиться на несколько т.н. вторичных точек  $A_i$ . Часть вторичных точек  $A_i$  может достигнуть второй стороны КА в пределах известного “квадрата” и быть зарегистрирована.

Каждой из трех систем свойственны одинаковые принципы функционирования: при попадании точки в датчик Д1 регистрация воздействия не производится; до первого воздействия точки на объект какое-то число датчиков Д2 теряет свою работоспособность; в системах САД и СКАД после каждого взаимодействия датчиков Д2 с точкой каждый из них может потерять свою работоспособность с известной вероятностью; в системе СКД датчик Д2 теряет свою работоспособность с вероятностью  $1 - \epsilon$  после взаимодействия с точкой при весьма малом  $\epsilon > 0$ ; при попадании точки в датчик Д3 регистрация взаимодействия производится в системах СКД и СКАД и не производится в системе САД; при попадании точки в Д3 все датчики, линии связи которых включают этот Д3, теряют свою работоспособность.

Системы регистрации имеют и исключительные особенности: при работе системы СКД в каждом цикле регистраций номера работоспособных и неработоспособных датчиков известны; признак срабатывания датчика Д3 – одновременность регистрации соответствующих наборов датчиков Д2; в системе САД неизвестны номера неработоспособных датчиков. При попадании точки в Д2 система СКАД ведет себя как САД, а при попадании точки в Д3 – как СКД.

Итак, необходимо создать математическую модель функционирования описанных систем, а также комплекс программ, ее реализующих, и собрать необходимый статистический материал для обобщения и выводов.

Методика оценки плотности по малому числу регистраций. Априори полагалось, что случайные частицы равномерно распределяются по поверхности КА. В данной работе плотность распределения восстанавливается на основе модернизированного метода прямоугольных вкладов МПВ. Модернизация основана: – на индивидуальном подходе к каждой зарегистрированной частице мусора; – на равномерном “размазывании” информации для обеспечения ее равномерной плотности, полученной от каждой регистрации, на конечном квадрате  $\pi$  размером  $x \times x$ , включающем тот датчик, который осуществил регистрацию

(сторона квадрата  $x$  определяется “эмпирически”); – на отказе от “размазывания” над теми частями других работоспособных датчиков регистрации, которые вошли в квадрат  $\pi$ ; – на использовании дополнительной, кроме самой выборки регистраций, априорной информации о случайной величине.

В программной реализации датчик Д2 – это “прямоугольник” со сторонами  $a, b$ , которые могут варьироваться в известных пределах. Все системы регистрируют точки, попадающие в этот прямоугольник. Датчик Д3 – система проводов от одного датчика Д2 до жгутов от датчика Д2. Часть объекта, на котором нет датчиков Д2, Д3, назовем (для удобства изложения) датчиком Д1.

Для того чтобы промоделировать гибкое расположение датчиков Д2 и Д3 на рабочей поверхности КА (реально датчики располагаются несимметрично, жгуты проходят не под прямыми углами, часть датчиков Д2, Д3 может деформироваться и т.д.), каждый из них разбивался на гипотетические мини-датчики (“маленькие” прямоугольники). За счет этих мини-датчиков в программе изменялась конфигурация датчиков Д2, Д3 на рабочей поверхности КА без изменения их площадей при моделировании ситуации. Точка  $A$ , пришедшая на первую сторону рабочей поверхности КА, может “пробить” ее с некоторой заданной вероятностью и разделиться на несколько т.н. вторичных точек  $A_i$ . Часть вторичных точек  $A_i$  может достигнуть второй стороны КА в пределах известного “квадрата” и быть зарегистрирована.

Каждой из трех систем свойственны одинаковые принципы функционирования: при попадании точки в датчик Д1 регистрация воздействия не производится; до первого воздействия точки на объект какое-то число датчиков Д2 теряет свою работоспособность; в системах САД и СКАД после каждого взаимодействия датчиков Д2 с точкой каждый из них может потерять свою работоспособность с известной вероятностью; в системе СКД датчик Д2 теряет свою работоспособность с вероятностью  $1 - \epsilon$  после взаимодействия с точкой при весьма малом  $\epsilon > 0$ ; при попадании точки в датчик Д3 регистрация взаимодействия производится в системах СКД и СКАД и не производится в системе САД; при попадании точки в Д3 все датчики, линии связи которых включают этот Д3, теряют свою работоспособность.

Системы регистрации имеют и исключительные особенности: при работе системы СКД в каждом цикле регистраций номера работоспособных и неработоспособных датчиков известны; признак срабатывания датчика Д3 – одновременность регистрации соответствующих наборов датчиков Д2; в системе САД неизвестны номера неработоспособных датчиков. При попадании

точки в Д2 система СКАД ведет себя как САД, а при попадании точки в Д3 – как СКД.

Нужно отметить, что для удобства моделирования четыре стороны поверхности КА разворачивались в плоскую фигуру (прямоугольник). Если регистрация  $i$ -й частицы произведена некоторым датчиком, то координатами  $(x_i, y_i)$  этой точки (в системе координат, привязанной к “развернутому” КА) по определению полагались координаты центра этого датчика. Всем частицам из разряда “оцененных” приписывались координаты, равномерно распределенные по поверхности ИСЗ, включающей работоспособные датчики. Этому зарегистрированному взаимодействию частицы с КА припишем элементарную равномерную плотность (функцию вклада)

$$\Psi_i(x, y) = \frac{1}{c_i d_i},$$

если  $x_i - \frac{c_i}{2} \leq x \leq x_i + \frac{c_i}{2}$ ,  $y_i - \frac{d_i}{2} \leq y \leq y_i + \frac{d_i}{2}$ ,

с учетом отмеченных выше условий (важный с прикладной точки зрения вопрос о выборе чисел  $c_i, d_i$  здесь не обсуждается). Линейное суммирование априорной плотности и вкладов для всех регистраций числом  $N$  приводит в итоге в соответствии с МПВ к искомой оценке нормированной плотности:

$$f^*(x, y) = \frac{1}{N+1} \left[ f_0(x, y) + \sum_{i=1}^N \Psi_i(x, y) \right],$$

где априорная плотность  $f_0 = 1/S$ ,  $S$  – площадь прямоугольника, символизирующего площадь поверхности КА.

В целом по результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы: 1) бортовая система СКД гарантированно (по множеству экспериментов) эффективнее системы САД при относительно небольшом (до 30) числе столкновений КА с мусором. Система САД гарантированно эффективнее СКД при длительной эксплуатации КА, подразумевающей значительное число столкновений КА с мусором. Именно системе САД целесообразно применять при исследовании плотности потоков космического мусора; 2) по результатам математического моделирования адаптированный метод прямоугольных вкладов показал свою эффективность при восстановлении плотности космического мусора. Улучшение точности оценивания в методике МРВ по сравнению с методикой ДТК\_М5 с использованием системы регистрации СКД составило 8%, с использованием системы регистрации САД – 15%. Полученные данные по улучшению точности оценивания с помощью МРВ устойчивы от эксперимента к эксперименту; 3) все методики одинаково оценивают углы подлета точек к КА с точ-

ностью порядка 10о; 4) улучшение точности и устойчивости оценивания позволяет говорить о надежности оценки числа точек, достигающих поверхности КА, с помощью систем САД и СКД в методике МРВ.

## 5. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В определенной мере ведомственная принадлежность исследователей космического мусора, материальная и техническая база этих предприятий накладывают отпечаток и на характер, и результаты исследований. В этой связи интересны и альтернативные точки зрения на изучаемую проблему.

В работе [54] рассмотрена общая стратегия космического мониторинга для обнаружения и последующей каталогизации космического мусора больших и малых размеров, представляющих опасность для Земли. Дается анализ схемы “оптического барьера”, создаваемого телескопами космического патруля, формулируются требования к системе наблюдения, предложены схемы визирования области оптического барьера для надежного обнаружения небесных тел, сближающихся с Землей, и определения их орбит. Проведено сравнение возможности расстановки космических аппаратов патруля на орбите Земли с помощью электроракетного двигателя и традиционного химического двигателя.

В работе [55] описывается концепция космической системы обнаружения дневных астероидов, которая обнаруживает не менее 95% опасных небесных тел размером более 10 м, летящих со стороны Солнца к Земле.

В работе [56] представлена система методов (методология) так называемого физического (стендового) моделирования долговременного воздействия высокоэнергичных ионов плазменной струи на космический мусор с целью перевода его на более низкую орбиту и последующего сгорания в атмосфере Земли.

В работе [57] рассматривается задача расчета параметров маневров с целью уклонения от встречи КА с крупногабаритным объектом космического мусора (КОКМ) на специфических орбитах. Похожая задача решалась в работе [58], где на примере КА *Канопус-В № 1*, функционирующего на орбите с наклоном 97.44° и средней высотой 518 км, рассматривалось уклонение КА от опасного космического мусора. Там же показано, что орбиты с наклонами около 98° и высотой 500–550 км являются наиболее “засоренными”, не только естественным мусором, но и нефункционирующими КА различного назначения. Отметим в этой связи работу [59].

Синхронно с российскими специалистами по проблеме космического мусора работают и наши

зарубежные коллеги. Из обширного списка литературы укажем здесь на источники [60–66].

## ВЫВОДЫ

Заявленная тема исследования реализована: проведен анализ большого объема публикаций по проблеме космического мусора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Космический мусор. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора / Под науч. ред. Райкунова Г.Г. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором / Под ред. Макарова Ю.Н. ЦНИИмаш, 2015.
3. IADC Space Debris Mitigation Guidelines [Электронный ресурс] / Inter-agency space debris coordination committee. [http://www.iadc-online.org/index.cgi?item=docs\\_pub](http://www.iadc-online.org/index.cgi?item=docs_pub)
4. Руководящие принципы Комитета ООН по космосу по предупреждению образования космического мусора. Резолюция 62-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН, A/RES/62/217 от 10.I.2008.
5. ГОСТ Р 52925-2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. М.: Стандартинформ, 2008.
6. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. М.: ИКИ РАН, 2012.
7. Технический доклад о космическом мусоре [Электронный ресурс]. <http://www.iadc-online.org/index.cgi?item=documents>
8. Горлов А.Е., Логинов С.С., Михайлов М.А. и др. Актуальные вопросы международной стандартизации в части техногенного засорения околоземного космического пространства // Космонавтика и ракетостроение. 2015. Вып. № 5(84). С. 101–106.
9. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013.
10. Orbital debris quarterly news [Электронный ресурс]. <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/newsletter.html>
11. Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Рязань: Book Jet, 2018.
12. Handbook for limiting orbital debris [Электронный ресурс]. <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/NHBK871914.pdf>
13. History of on-orbit satellite fragmentations 14th edition [Электронный ресурс]. <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/SatelliteFragHistory/TM-2008-214779.pdf>
14. Старков А.В. Синтез алгоритмов управления космическими аппаратами с учетом требований безопасности проведения динамических операций. Дис. канд.техн.наук. Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет). 2012.
15. Sentinel-1A collision, информационное сообщение [Электронный ресурс]. <http://www.esa.int>.
16. Смирнов Н.Н. Эволюция “Космического мусора” в околоземном космическом пространстве // Успехи механики. 2002. Т. 1. № 2. С. 13–104.
17. Назаренко А.И. Задачи стохастической космодинамики. Математические методы и алгоритмы решения. М.: ЛЕНАНД, 2018.
18. Лебедев А.А. Введение в анализ и синтез систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2001.
19. Миронов В.В., Муртазов А.К. Модель метеороидного риска в околоземном космическом пространстве // Космич. исслед. 2015. № 53. Т. 6. С. 425–432. (Cosmic Research. P. 430)
20. Lemmens S., Flohrer T. Review of global achievements in clearing LEO and GEO protected zones/33nd IADC Meeting. Houston, USA, 2015.
21. Juan Carlos Dolado Perez. Analysis of mitigation guidelines compliance at international level in low Earth orbit // 65th International Astronautical Congress. 2014. IAC-14,A6,4,4,x21608.
22. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of Debris Belt // J. Geophysical Research. 1978. V. 83. A6. P. 2637–2646.
23. Kessler D.J. Collisional cascading the limits of population growth in low Earth orbit // Advances in Space Research. 1991. V. 11. № 12. P. 63–66.
24. Назаренко А.И. Прогноз на 200 лет, синдром Кесслера [Электронный ресурс]. <http://satmotion.ru/engine/documents/document85.pdf>
25. Nazarenko A.I. Space debris status for 200 years ahead & the Kessler effect // 29-th IADC Meeting. Berlin, Germany, 2011.
26. IADC Report AI 27.1. Stability of the Future LEO Environment [Электронный ресурс]. <http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-2012-08,%20Rev%201,%20Stability%20of%20Future%20LEO%20>
27. Liou J.-C. An active debris removal parametric study for LEO environment remediation // Progress in Propulsion Physics. 2013. V. 4. P. 735–748.
28. J.-C. Liou, Nicholas L. Johnson. A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO // Advances in Space Research. 2011. № 47. P. 1865–1876.
29. Phipps C.R. ORION: Clearing near-Earth space debris using a 20-kW, 530 nm, Earth-based, repetitively pulsed laser // Laser and Particle Beams. 1996. V. 14. № 1. P. 1–44.
30. Миронов В.В., Мухин А.В. Методика оценки плотности космического мусора по малой выборке // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2008. Т. 32. № 2. С. 234–237.
31. Миронов В.В. Датчики, системы контроля и диагностики воздействия космического мусора на космические аппараты // Датчики и системы. ИПУ РАН. 2014. № 9. С. 2–9.
32. Action Item 31.5 Benefits of active debris removal in LEO in light of the investigation of uncertainties contributing to long-term environment modeling zones / 34th IADC Meeting. Beijing, China, 2014.
33. Усовик И.В., Мальшев В.В., Дарных В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низ-

- ких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 54–62.
34. Усовик И.В. Анализ характеристик потока космического мусора на низких околоземных орбитах с использованием уточненной модели // Космонавтика и ракетостроение. 2014. Вып. 3. № 76. С. 97–102.
  35. Горлов А.Е., Усовик И.В. Влияние активного удаления космического мусора на долгосрочное состояние техногенного засорения низких околоземных орбит // Космонавтика и ракетостроение. 2015. Вып. 5. № 84. С. 101–106.
  36. Усовик И.В. Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МАИ, 2015.
  37. Liou J.-C., Hall D.T., Krisko P.H., Opiela J.N. LEG-  
END – a three-dimensional LEO-to-GEO debris evolutionary model // Advances in Space Research. 2004. V. 34. № 5. P. 981–986.
  38. Klinkrad H. Space Debris Models and Risk Analysis. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2006.
  39. Space Debris. A Report of ESA. Paris, 1988. № SP 1109.
  40. Пудовкин О.Л., Пряхина Е.Б. Распространение техногенных тел в околоземном пространстве и оценка их воздействия на космические аппараты // Космич. исслед. 1994. Т. 32. Вып. 4. С. 76.
  41. Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. Рязань: Book Jet, 2017.
  42. Миронов В.В., Муртазов А.К. Методы контроля ближнего космоса. Рязань: Book Jet, 2017.
  43. Миронов В.В. Обработка данных и гарантированное оценивание параметров космических систем. Рязань: Book Jet, 2018.
  44. Mironov, V.V., Murtafov A.K. Model of Meteoroid Risk in Near-Earth Space // Pleiades Publishing, Ltd. 2015. V. 53. № 6. P. 430–436.
  45. Mironov V.V. A technique for estimating the space debris density from the data of onboard recording systems // Cosmic Research. 2003. V. 41. № 2. P. 204–208.
  46. Mironov V.V. A Comparison of Systems for Recording Space Debris // Cosmic Research. 1996. V. 34. № 4. P. 382–386.
  47. Миронов В.В. Обработка данных и гарантированное оценивание параметров космических систем. Рязань: Book Jet, 2018.
  48. Грудин Д.В., Матюшин М.М., Паненко В.С., Царук А.В. Обеспечение уклонения космического аппарата “Канопус-В” № 1 от опасного сближения с космическим мусором // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 1(100). С. 60–68.
  49. Миронов В.В. Модифицированный симплекс-метод решения задачи гарантирующего оценивания параметров. Программа PR\_GIP. М.: ВНТИЦ, 2000. № 50200000020.
  50. Миронов В.В. Оценивание плотности космического мусора с помощью систем регистраций методом прямоугольных вкладов. Программа MPV М.: ВНТИЦ, 2000. № 50200000021.
  51. Миронов В.В. Прямой симплекс-метод решения задачи гарантирующего оценивания параметров. Программа PR\_ . М.: ВНТИЦ, 2000. № 50200000022.
  52. Миронов В.В. Сравнение систем регистрации и оценивания внешнего воздействия частиц и осколков на космические и летательные аппараты. Программа DTK\_M5. М.: ВНТИЦ, 2000. № 50200000025.
  53. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. М.: Статистика, 1978.
  54. Энеев Т.М. К вопросу об астероидной опасности. // Компьютерные инструменты. 2003. Вып. 2. С. 13–19.
  55. Зверева М.А., Нароенков С.А., Шустов Б.М., Шугаров А.С. Космическая система обнаружения опасных небесных тел, приближающихся к Земле с дневного неба (“СОДА”) // Космич. исслед. 2018. Т. 56. № 4. С. 300–310. (Cosmic Research. P. 283)
  56. Шувалов В.А., Горев Н.Б., Токмак Н.А., Кочубей Г.С. Физическое моделирование длительного воздействия плазменной струи на объект “космического мусора” // Космич. исслед. 2018. Т. 56. № 3. С. 243–251. (Cosmic Research. P. 223)
  57. Баранов А.А., Будянский А.А., Разумный Ю.Н. Управление движением космического аппарата при подлете к крупногабаритному объекту космического мусора // Космич. исслед. 2017. Т. 55. № 4. С. 285–289. (Cosmic Research. P. 270)
  58. Грудин Д.В., Матюшин М.М., Паненко В.С., Царук А.В. Обеспечение уклонения космического аппарата “Канопус-В” № 1 от опасного сближения с космическим мусором // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 1. С. 60–68.
  59. Бахтигараев Н.С., Левкина П.А., Карнов Н.В., Чазов В.В. Наблюдения неизвестного фрагмента космического мусора в Терскольской обсерватории. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2011. Т. 39. № 6. С. 186–189.
  60. Alby F. Status of CNES optical observations of space debris in geostationary orbit // Advances in Space Research. 2004. V. 34. P. 1143–1149.
  61. Hanada T. Theoretical and empirical analysis of the average crosssectional areas of breakup fragments // Advances in Space Research. 2011. V. 47. P. 1480–1489.
  62. Hanada T. Using Breakup Models and Propagators to Devise Debris Search Strategies in GEO // Advances in the Astronautical Sciences. 2002. V. 110. P. 373–385.
  63. Kamensky S., Khutorovsky Z. Determination of Satellite Origin: Ways to Improve the Catalog // Proc. of Second European Conf. on Space Debris. Darmstadt, 1997.
  64. Valk S. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // Advances in Space Research. 2009. V. 43. P. 1509–1526.
  65. Seitzer P. Modest observations of space debris at geosynchronous orbit // Advances in Space Research. 2004. V. 34. P. 1139–1142.
  66. Rong-yu Sun. Dynamical evolution of high area-to-mass ratio objects in Molniya orbits // Advances in Space Research. 2013. V. 51. P. 2136–2144.