

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Усовик Игорь Вячеславович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И МЕТЕОРОИДОВ ДЛЯ
РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОГРАНИЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО
ЗАСОРЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Специальность: 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Мальшев В.В.

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

- Научный консультант: Малышев Вениамин Васильевич, заслуженный деятель науки РФ доктор технических наук, профессор, профессор кафедры 604 «Системный анализ и управление» МАИ.
- Официальные оппоненты: Аксенов Олег Юрьевич – д.т.н., проф., заместитель генерального директора по научно-техническому развитию Публичного акционерного общества «Межгосударственная акционерная Корпорация «Вымпел» (МАК «Вымпел»).
- Юркевич Евгений Владимирович – д.т.н., проф., главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова» Российской Академии Наук (ИПУ РАН).
- Москвитин Алексей Эдуардович – д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИИ «Фотон» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».
- Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК СПП»)

Защита состоится «10» октября 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/doctor/?ELEMENT_ID=180455

Автореферат разослан « » 2024 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
24.2.327.03, д.т.н., доцент

А.В. Старков

Актуальность темы

Техногенное засорение околоземного космического пространства (ОКП) существенно увеличивается в результате разрушений отработавших изделий ракетно-космической техники (РКТ) и роста количества пусков ракет-носителей (РН), выводящих на орбиты всё большее количество космических аппаратов (КА), особенно в области низких околоземных орбит (НОО) до 2000 км, что связано со следующими обстоятельствами:

- запуском малоразмерных КА (типа «кубсат» и др.);
- развертыванием больших орбитальных группировок КА (типа «Starlink» и «OneWeb»).

Растёт суммарная масса выводимых в космическое пространство объектов вследствие:

- роста количества пусков РН, в основном за счёт применения многоразовых возвращаемых ступеней;
- применения сверхлёгких и сверхтяжёлых РН.

У человечества существует два фундаментальных метода управления будущим состоянием техногенного засорения ОКП: предотвращение образования и активное удаление космического мусора (КМ), и всего один метод для решения прикладных задач оценки и прогноза потоков частиц – моделирование засорения ОКП объектами естественного и техногенного происхождения. Ученые до сих пор спорят о правильном названии процесса роста объектов КМ и применяют к нему как термин загрязнение, в контексте терминологии экологии, так и термин засорение, в смысле заполнения чем-нибудь вредным для деятельности человека в космосе. Далее по тексту могут использоваться оба этих термина, в зависимости от акцента рассматриваемой проблемы. Принятие руководящих принципов предупреждению образования КМ сократило темпы его роста. В России они содержатся в ГОСТ Р 52925-2018, требования которого предъявляются ко всем модернизируемым и создаваемым космическим средствам (КСр) – КА, разгонным блокам (РБ), последним ступеням РН. Активное удаление КМ за прошедшее десятилетие перешло из направления научных исследований в практику космической деятельности (КД). Оценена эффективность активного удаления КМ на состояние среды КМ и определены области для первоочередного проведения операций, проведен ряд космических экспериментов по отработке технологий активного удаления (RemoveDebris, Astroscale и др.), осуществлены операции по возвращению к работоспособности 2-х КА Intelsat с орбит захоронения выше геостационарной орбиты (ГСО) и увод КА Veidou с ГСО на орбиту захоронения с использованием специализированных КА, которые стыкуются с уводимыми

объектами. В ближайшее десятилетие планируются проекты по активному удалению наиболее крупных объектов КМ в плотные слои атмосферы или на орбиты захоронения. Исследования ведущих учёных в данной предметной области показали, что техногенное засорение ОКП при различных сценариях осуществления КД будет продолжать увеличиваться. Применение существующих мер ограничения образования КМ недостаточно для снижения его роста, в связи с существенным ростом трафика запусков КА и возможным возникновением в определенных диапазонах высот и размеров КМ «цепных» реакций столкновений КМ – так называемого "синдрома Кесслера".

Теоретические исследования по моделированию потоков КМ в разных странах ведутся более тридцати лет. Пионерами в данной области являются D.Kessler, J.-C. Liou, H. Klinkrad, А.И. Назаренко, Н.Н. Смирнов, и другие учёные. Принципиальными особенностями разрабатываемых моделей потоков КМ и метеороидов являлись применение детерминированного или стохастического подходов. В работах D. Kessler, J.-C. Liou развиваются детерминированные методы и алгоритмы, основанные на поштучном расчете каждого объекта с заданными характеристиками и последующей экстраполяцией на некоторые множества объектов со схожими параметрами. В работах А.И. Назаренко, Н.Н. Смирнова развиваются статистические методы и алгоритмы, основанные на использовании различных распределений для расчета характеристик потоков частиц. Существующие методики и статистическая модель космического мусора, разработанные А.И. Назаренко [14], характерная черта которых состоит в рассмотрении КМ различных диапазонов размеров с использованием статистически независимых распределений по их характеристикам и орбитальным параметрам, позволяют решать широкий круг задач. Однако сегодня возник новый класс задач оценки и прогнозирования потоков КМ в условиях существенного изменения КД, для которых разработанные ранее методы и алгоритмы не применимы.

Автором диссертации предлагается максимальное использование преимуществ обоих подходов для создания методических основ моделирования потоков КМ и метеороидов, решения новых задач, возникающих в связи с изменяющимися тенденциями осуществления КД, позволяющих проводить оценки характеристик плотностей потока частиц, влияния мер ограничения образования и активного удаления КМ на уровень техногенного засорения ОКП в долгосрочной перспективе, оценку влияния различных условий КД на состояние техногенного засорения и решения целого ряда других прикладных задач. Начиная с уровня Организации Объединенных Наций (ООН) поставлена задача обеспечения

долгосрочной устойчивости КД в условиях развития новых тенденций использования ОКП, большей частью которой является проблема космического мусора и безопасности космических операций. Однако до недавнего времени в Российской Федерации не было достаточных для информационного обеспечения решения этой задачи методик и алгоритмов моделирования потоков КМ и метеороидов, которые должны использоваться для оценки и прогнозирования характеристик воздействия на КСр, оптимизации проектных и баллистических параметров КСр, а также подготовки исходных данных для принятия управленческих решений по мерам и требованиям ограничения техногенного засорения ОКП на основе результатов долгосрочного прогнозирования потоков КМ.

В обеспечение развития данного направления исследований разработаны новые методы и алгоритмы моделирования КМ и метеороидов, создающие новую методологическую основу моделирования потоков КМ и метеороидов. Они позволяют оценивать потоки метеороидов и КМ для КА на различных орбитах с учетом условных плотностей распределений КО по орбитальным параметрам и характеристикам, прогнозировать техногенное засорение с учетом мер ограничения образования КМ, активного удаления КМ и новых условий осуществления КД, а также позволяющие решать целый ряд других прикладных задач ограничения техногенного засорения ОКП. Отличительной особенностью разработанных методик, алгоритмов и моделей является использование условных статистических распределений КМ по характеристикам и орбитальным параметрам, а также применение для различных групп объектов отдельного моделирования – «поштучно» или в виде статистических распределений параметров и характеристик.

Научная проблема

В диссертации содержится теоретическое обобщение и решение научной проблемы информационного обеспечения безопасности осуществления космических операций в условиях воздействия космического мусора и метеороидов.

Целью диссертационной работы является формирование основы информационного обеспечения безопасности осуществления космических операций с использованием оценок и прогнозов по разработанным методам и алгоритмам моделирования потоков космического мусора и метеороидов в условиях существенного изменения космической деятельности.

Объект исследования

космический мусор и метеороиды.

Предмет исследования

методы и алгоритмы моделирования потоков космического мусора и метеороидов на основе разделения множеств объектов и условных плотностей распределений параметров и характеристик.

Задачи исследования

разработать методы и алгоритмы моделирования потоков космического мусора и метеороидов на основе разделения множеств объектов и условных плотностей распределений параметров и характеристик для оценок и прогнозов в условиях существенного изменения космической деятельности;

провести исследование разработанных методов и алгоритмов, а также их верификацию;

на основе результатов применения методов и алгоритмов решить прикладные задачи ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства и сформировать базу для информационного обеспечения безопасности осуществления космических операций.

Методы исследования

системный анализ, математическое и статистическое моделирование, механика космического полета, теория управления, методы обработки данных.

Научная новизна и значимость работы содержится в (пункты паспорта специальности 2.3.1 указаны в скобках):

1) формализации задач системного анализа проблемы космического мусора и моделирования потоков космического мусора и метеороидов (п. 2);

2) методах и алгоритмах расчета характеристик потока спорадических метеороидов в ОКП, отличающихся использованием нового метода учёта гравитационного эффекта, для формирования информационного обеспечения безопасности проведения космических операций при принятии решений на этапе проектировании космических аппаратов (пп. 10, 17);

3) методах и алгоритмах расчета характеристик потока КМ, основанных на условных статистических распределениях орбитальных параметров и характеристик, для формирования информационного обеспечения безопасности проведения космических операций при принятии решений на этапе проектировании космических аппаратов (пп. 10, 17);

4) комплекс алгоритмов для прогнозирования техногенного засорения ОКП при реализации мер ограничения образования и активного удаления КМ, основанной на статистических методах и алгоритмах, а также отдельном моделировании групп объектов, для подготовки исходных данных при принятии

управленческих решений в области технологий ограничения и снижения техногенного засорения ОКП (пп. 10, 17).

Практическая значимость результатов исследования

1) получены характеристики плотностей потока КМ в ОКП и для КА на различных орбитах при различных сценариях осуществления КД, задающие условия функционирования КСр, на основании которых разработан и введён в действие государственный стандарт ГОСТ Р 25647.167 – 2022 «Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве»;

2) разработана архитектура и реализация программно-алгоритмического обеспечения расчета текущих и прогнозируемых характеристик потока КМ и метеороидов которое используется в организациях, проектирующих космическую технику;

3) разработаны предложения по использованию оценок потоков КМ и метеороидов в прикладных задачах при проектировании средств выведения и космических аппаратов, а также для принятия управленческих решений по мерам и требованиям ограничения техногенного засорения ОКП на основе результатов долгосрочного прогнозирования потоков КМ.

4) Достоверность результатов

подтверждается использованием верифицированного математического аппарата, обоснованием результатов сравнительного анализа с аналогичными методиками и моделями, а также доступными экспериментальными данными.

Внедрение результатов диссертационной работы

Результаты работы внедрены в исследования по грантам Президентской программы РФ и Президента РФ для молодых учёных кандидатов наук, Государственном стандарте ГОСТ Р 25647.167 – 2022 «Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве», который внедрён в ПАО «РКК Энергия», АО «НПО им. Лавочкина» и других организациях ракетно-космической промышленности, программах для ЭВМ и патентах, принадлежащих Российской Федерации в лице Госкорпорации «Роскосмос», а также в учебный процесс кафедры 604 «Системный анализ и управление» МАИ и кафедры «Механики и процессов управления» Инженерной Академии Российского университета дружбы народов.

Апробация работы

Результаты работы апробированы, получили одобрение, опубликованы в тезисах и трудах международных и отечественных научно-технических

конференций: «Космонавтика и ракетостроение: взгляд в будущее» (г. Королёв, ЦНИИмаш, 2016), XV Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 2016), Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, 2017), XLI Академические чтения по космонавтике (г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2017), 7-я Европейская конференция по космическому мусору (г. Дармштадт, Германия, 2017), 68-й Международный астронавтический конгресс (г. Аделаида, Австралия, 2017), 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения» (г. Рязань, РГРТУ, 2017), Белорусский космический конгресс (г. Минск, Белоруссия, 2017), 53-и Научные чтения памяти К.Э. Циолковского (г. Калуга, 2018), Всероссийская конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы» (г. Москва, ИКИ РАН, 2019), Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, 2019), XLIII Академические чтения по космонавтике (г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2019), 55 Научные чтения памяти К.Э. Циолковского (г. Калуга, 2020), Международная конференция Space Flight Safety (г. Санкт-Петербург 2021), 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 2021), Космонавтика XXI века (г. Королёв, ЦНИИмаш, 2021), «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, 2021), Международная конференция Space Flight Safety (г. Санкт-Петербург, 2022), 14-й Всероссийский конкурс «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики», Международная конференция Space Flight Safety (г. Санкт-Петербург, 2023), 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 2023) и др.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 24 статьях, входящих в рецензируемых изданиях Перечня ВАК Минобрнауки России (включая 15 в изданиях по специальности 2.3.1.), 14 рецензируемых изданиях Перечня Scopus (включая 11 Web of Science и 8 в журналах Q1), в 4 монографиях, в сборниках тезисов и трудов 40 конференций, а также используются в 3 программах для ЭВМ, 4 патентах и одном ГОСТ.

Основные положения, выносимые на защиту

1) формализация задач системного анализа проблемы космического мусора и совершенствования методов и алгоритмов моделирования потоков космического мусора и метеороидов;

2) методы и алгоритмы расчета характеристик потока спорадических метеороидов в ОКП с учётом гравитационного эффекта;

3) методы и алгоритмы расчета характеристик потока КМ на основе условных статистических распределений орбитальных параметров;

4) методика прогнозирования техногенного засорения ОКП при реализации различных сценариев осуществления космической деятельности на основе раздельного моделирования различных групп объектов;

5) архитектура и реализация специального программно-математического обеспечения для расчета плотностей потока КМ и метеороидов, прогнозирования техногенного засорения ОКП;

6) характеристики плотностей потока КМ для КА на различных орбитах при различных сценариях осуществления КД, на основании которых разработан и введен в действие государственный стандарт;

7) предложения по использованию оценок потоков КМ и метеороидов в прикладных задачах ограничения техногенного засорения ОКП.

Личный вклад. Представленные результаты исследований получены соискателем лично. Эти исследования включают формализацию задач, разработку методов и алгоритмов, создание на их основе архитектуры специального программно-математического обеспечения, получение и анализ результатов, формулирование выводов. Из работ, опубликованных автором в соавторстве, в диссертацию вошёл только материал, принадлежащий лично автору. Заимствованные положения обозначены ссылками на их источники.

Первая глава содержит обоснование необходимости развития методологии моделирования КМ и области применения методик и алгоритмов расчета потоков КМ для решения прикладных задач ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства, постановку задач исследования на основе анализа проблемы КМ, методов его ограничения, снижения и моделирования. На рисунках далее представлена декомпозиция проблем космического мусора, методов их решения и особенности управления состоянием засорения ОКП.



Рисунок 1 – Проблемы КМ

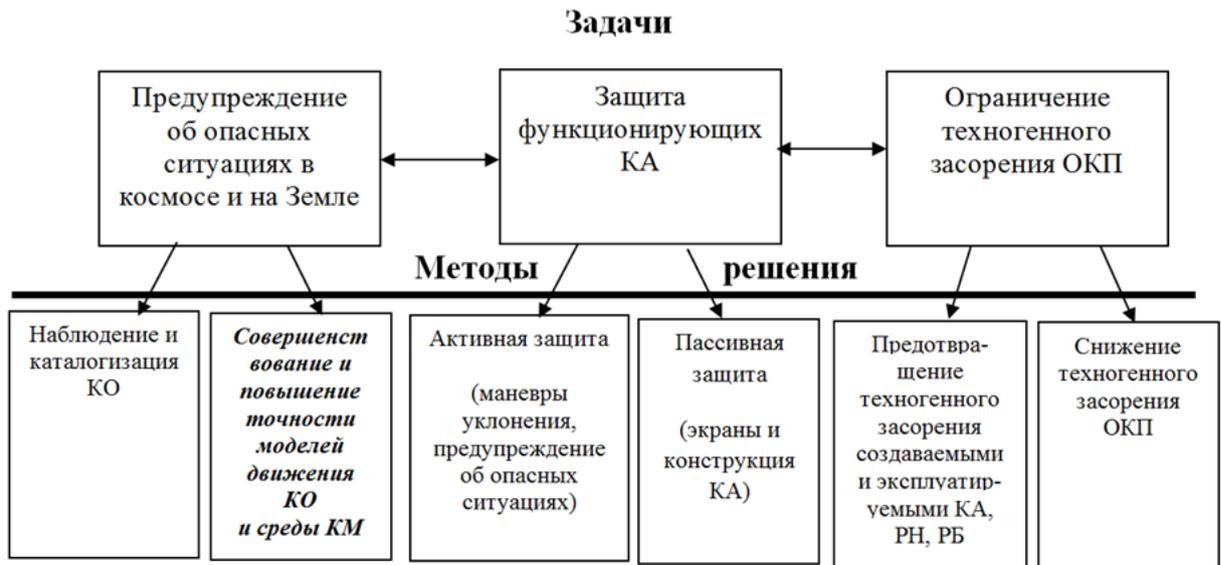


Рисунок 2 - Задачи и методы решения проблем КМ

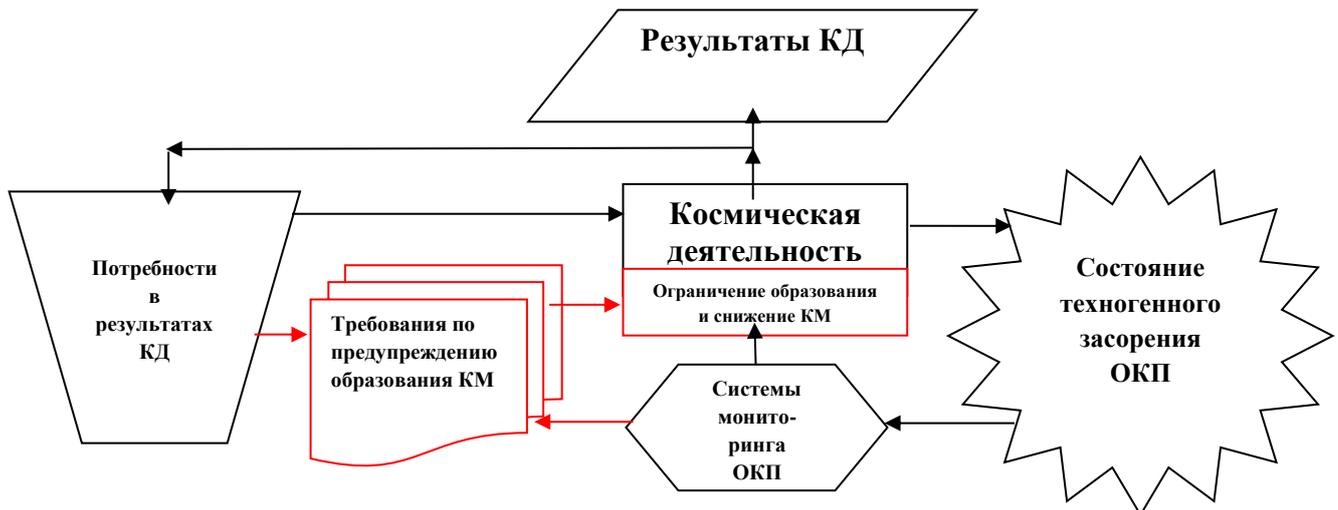


Рисунок 3 – Общая схема «управления» состоянием техногенного засорения ОКП

Вторая глава содержит описание разработанных методик и алгоритмов расчёта плотности потока спорадических метеороидов в ОКП, как основного источника рисков безопасности космических полетов со стороны частиц размером менее 1 мм, а также как источник появления частиц размером менее 1 мм. В методике используются исходные данные по модели метеороидов Cour-Palais с учетом последних экспериментальных данных, учет затенения Землей и гравитационный эффект. Отличительной особенностью разработанной методики является учет влияния гравитационного эффекта не только на модуль скорости, но и на направление вектора скорости, что рассчитывается с использованием специальной методики, разработанной автором. Исследуются фоновые (sporadic, background) метеороиды, поток которых является стационарным. Все направления их подлета к грависфере Земли являются равновероятными. Оцениваются

характеристики потока этих частиц относительно орбит на высотах до области ГСО. В модели аппроксимации значений плотности потока в зависимости от массы (размеров) задаётся $Q(m > 10^{-6} \text{ г}) = 12.0 \text{ 1/(м}^2 \text{ год)}$. Другой важной характеристикой метеороидов являются данные о возможных значениях их скорости. В разработанной методике используется среднее распределение, в основу которого положены данные модели Cour-Palais. Этому распределению соответствует среднее значение скорости 20,16 км/сек. Важно отметить, что приведенные данные о скорости метеороидов относятся к дальнему космосу. При приближении к Земле скорость частиц меняется в результате влияния гравитационного притяжения Земли.

Алгоритм расчёта состоит из нескольких частей: для того, чтобы определить среднюю плотность потока через сферу, необходимо задать параметры орбиты, для которой будет произведен расчет. Так как направления полёта метеороидов считаются равновероятными и при приближении их к грависфере Земли действуют только два эффекта (гравитационный эффект и эффект затенения), то при расчете для околокруговой орбиты можно задать только высоту перигея (H_n), а для эллиптических орбит - дополнительно высоту апогея (H_a). Орбита разбивается на N точек по истинной аномалии $\theta_i \in [0: 360]$. Для каждой точки с использованием уравнения Кеплера рассчитывается соответствующий момент времени $t_i \in [0: T]$, $i = 1..N$, где T – период обращения спутника.

Затем по разработанному алгоритму рассчитывается приращение скорости метеороидов и коэффициент гравитационного эффекта. В каждой точке орбиты организуется перебор всех возможных направлений полёта частиц, которые характеризуются двумя углами (Az и θ) в подвижной орбитальной системе координат. Элементарный телесный угол задается равномерным разбиением на N_{az} интервалов по азимуту и N_{teta} интервалов по углу места, $k = 1 \dots N_{Az}$, $m = 1 \dots N_{teta}$.

$$Az_k \in [0: 360] \text{ град.}, \theta_m \in [-90: 90] \text{ град.}, \Delta Az_k = \frac{360}{N_{az}}, \Delta \theta_m = \frac{180}{N_{teta}}.$$

Для каждого из этих направлений рассчитывается плотность протока через элементарный телесный угол:

$$dQ_i(V_j, Az_k, \theta_m) = Q_\infty \cdot k_{(V)_j} \cdot p(V_{(\infty)_j}) \cdot \frac{\cos \theta_m \cdot \Delta Az_k \cdot \Delta \theta_m}{4\pi} \cdot k_{(g)_i}. \quad (1)$$

dQ_i – плотности потока частиц в рассматриваемом элементарном телесном угле *относительно сферы* в данной точке орбиты; $p(V_{(\infty)_j})$ – исходное статистическое распределение скорости метеороидов $V_{(\infty)_j}$.

Каждому из значений параметров (V_j, Az_k, θ_m) соответствуют конкретные значения относительной скорости и данные о ее направлении. Для этого вычисляется вектор относительной скорости в виде разности векторов скорости метеороидов $\mathbf{V}(V_j, Az_k, \theta_m)$ и $\mathbf{V}_{КА}$:

$$\mathbf{V}_{(rel)i}(V_j, Az_k, \theta_m) = \mathbf{V}(V_j, Az_k, \theta_m) - \mathbf{V}_{(КА)i}. \quad (2)$$

Естественно, что плотность потока частиц со скоростью $V_{(rel)i}(V_j, Az_k, \theta_m)$ относительно заданной поверхности отличается от исходной оценки Q_∞ . Для учета относительной скорости рассчитывается коэффициент k_v , который учитывает скорость КА и рассчитывается:

$$k_{(v)j} = \frac{V_{(rel)i}(V_j, Az_k, \theta_m)}{V_{(end)j}} \quad (3)$$

$k_{(g)i}$ – коэффициент гравитационного эффекта, рассчитанный для данной высоты с использованием методики из раздела 2.2.

Для учета затенения рассчитывается косинус предельного угла, при котором наступает затенение: $\cos \theta_i = \frac{R_E + H_a}{r_i}$, где $R_E = 6378$ км, $H_a \approx 100$ км, r_i – геоцентрическое расстояние до спутника в данной точке орбиты.

Суммарный поток через сферу в данной точке орбиты рассчитывается суммированием всех оценок (2.29) при условии отсутствия затенения

$$Q_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^{N_{vj}} \sum_{k=1}^{N_{az}} \sum_{m=1}^{N_{\theta m}} dQ_i(V_j, Az_k, \theta_m). \quad (4)$$

Для каждой точки на орбите также рассчитывается $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, где t_i и t_{i+1} – время в текущей и следующей точках, которое рассчитывается с помощью уравнения Кеплера. Среднее значение плотности потока за виток определяется путем усреднения оценок (2.33) по времени:

$$\bar{Q}_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{\Sigma i} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}. \quad (5)$$

Где $\sum_{i=1}^N \Delta t_i = T$ - период обращения спутника.

Практический интерес представляет построение статистических распределений различных характеристик потока метеороидов: для величины и направления относительной скорости.

$$p(V_{rel}, A, \beta) = \frac{\sum dQ(V_{rel}, A, \beta)}{\sum_{V_{rel}} \sum_A \sum_\beta dQ(V_{rel}, A, \beta)}. \quad (6)$$

Здесь в числителе суммирование ведется по всем попаданиям конкретных аргументов в соответствующий трехмерный «ящик». Аналогично строятся двумерные и скалярные распределения этих характеристик.

$$A = \arctan\left(\frac{V_{rel}^W}{V_{rel}^T}\right)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_{rel}^R}{\sqrt{(V_{rel}^T)^2 + (V_{rel}^W)^2}}\right) \quad (7)$$

На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма.

В таблице 1 приведены оценки плотности потока метеороидов в дальнем космосе, относящиеся к частицам разных размеров.

Таблица 1 - Плотность потока метеороидов разных размеров

Размеры, см	>0,01	>0,0124	>0,025	>0,05	>0,10	>0,25
Q [1/(м ² год)]	26,30	11,97	0,92	0,0727	0,0058	0,0002

Из этих оценок видно, что по мере увеличения размера метеороидов плотность потока метеороидов резко уменьшается. Для частиц размером порядка 0.1 см она становится близкой к плотности потока искусственного космического мусора. При дальнейшем уменьшении размеров техногенные частицы становятся основным источником загрязнения околоземного пространства. По мере приближения к Земле скорость частиц увеличивается. Соответствующие результаты расчетов представлены в таблице 2.

В таблице 3 представлены основные характеристики потока метеороидов массой более 10⁻⁶ г (размером более 0,0124 см) для четырех типов орбит с высотами 450 км, 1000 км, 20000 км (СВО) и 36000 км (ГСО). А именно, приведены:

- усредненная за виток плотность потока Q (1/м² год);
- то же, но без учета гравитационного эффекта ($k_g=1$);
- среднее значение относительной скорости V_{rel} (км/сек);
- максимальные значения гравитационного коэффициента ($k_g \max$);
- минимальные значения гравитационного коэффициента ($k_g \min$).

Приведенные в таблице 3 оценки плотности потока Q отличаются от исходного значения $Q_0=12.0$ 1/м² год в результате влияния трех факторов:

- затенение потока частиц Землей;
- увеличение скорости частиц под действием гравитации Земли;
- влияние гравитационного эффекта (коэффициент k_g) в результате искривления траектории.

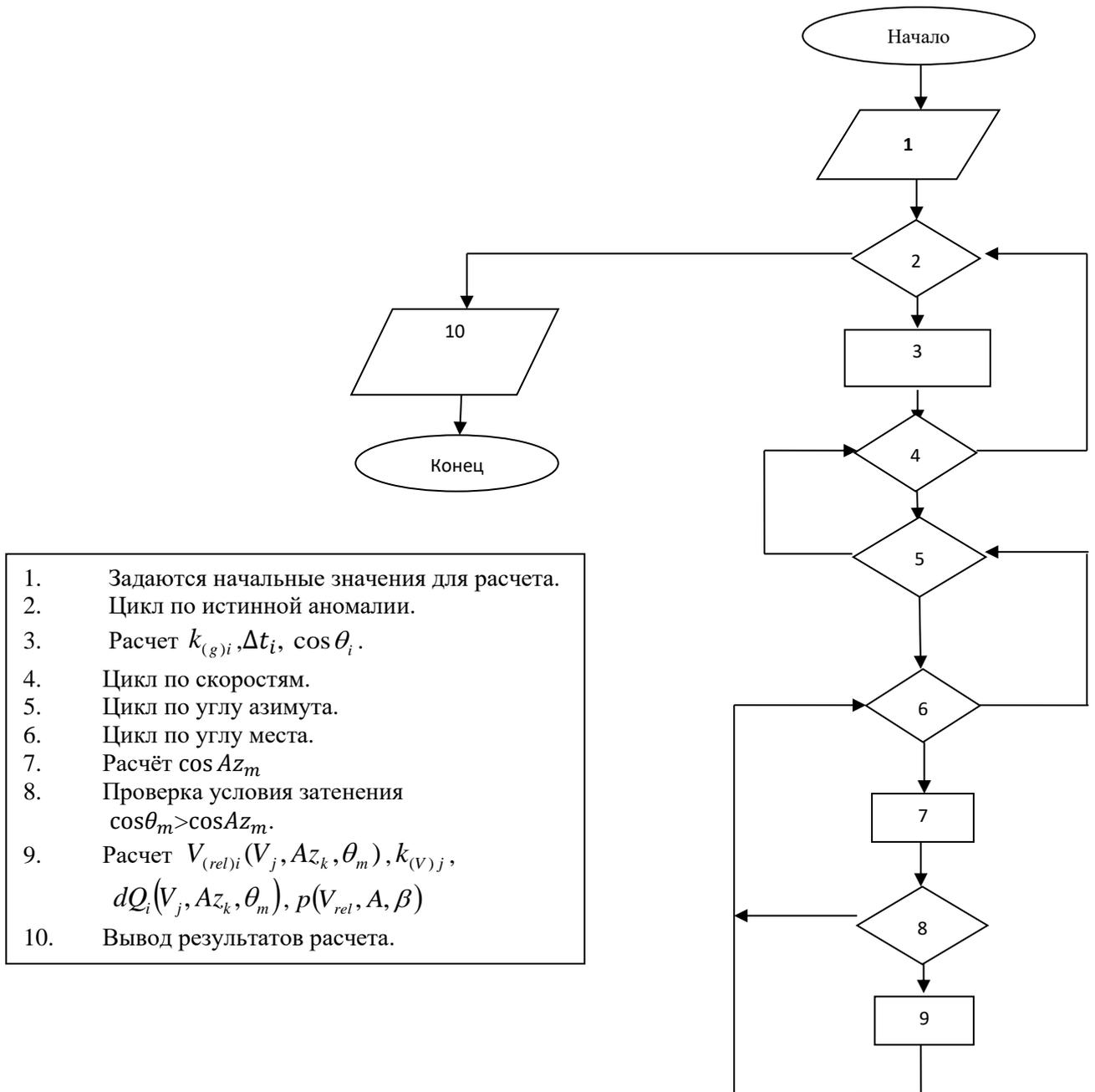


Рисунок 4 - Блок-схема алгоритма для расчёта потока метеороидов относительно сферы единичного сечения

Таблица 2 - Значения скорости: исходные и на разных высотах, км/сек

Высота	Номер диапазона значений скорости										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
исходная	12,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	54,0	60,0	66,0	72,0
36000 км	12,64	18,44	24,33	30,26	36,22	42,19	48,16	54,14	60,13	66,12	72,11
20000 км	13,06	18,74	24,55	30,44	36,37	42,31	48,27	54,24	60,22	66,20	72,18
1000 км	15,46	20,46	25,80	31,42	37,18	43,00	48,88	54,78	60,70	66,63	72,58
450 км	15,65	20,59	25,89	31,49	37,23	43,05	48,92	54,81	60,73	66,66	72,60

Таблица 3- Характеристики плотности потока метеороидов для разных орбит КА

Высота орбиты	450 км	1000 км	20000 км	36000 км
Q ($1/m^2$ год);	15,17	14,52	13,10	12,74
то же, $kg=1$	9,25	10,30	12,29	12,27
V_{rel} (км/сек)	22,5	23,3	21,1	20,1
kg max	2,933	2,200	1,252	1,195
kg min	1,032	1,022	1,013	1,005

Первый из упомянутых факторов приводит к уменьшению плотности потока. Это четко видно из данных второй строки таблицы 3. Другие два фактора оказывают противоположное воздействие – увеличивают плотность потока. Это также четко видно из данных таблицы. Наибольшее влияние гравитационного эффекта проявляется для КА на низких орбитах.

На рисунках 5 и 6 представлены статистические распределения направлений скорости подлета метеороидов к КА на разных орбитах.

Из данных рисунка 3 четко видно влияние эффекта затенения, которое растет по мере уменьшения высоты орбиты. В результате для орбиты МКС (высотой 450 км) отсутствуют направления подлета частиц в окрестности направления на Землю. Влияние этого эффекта на поток частиц относительно КА на высоких орбитах (СВО и ГСО) практически отсутствует.

Азимутальные распределения, представленные на рисунке 6, являются «похожими» для всех рассмотренных типов орбит. Для более низких орбит максимум распределения выражен более сильно.

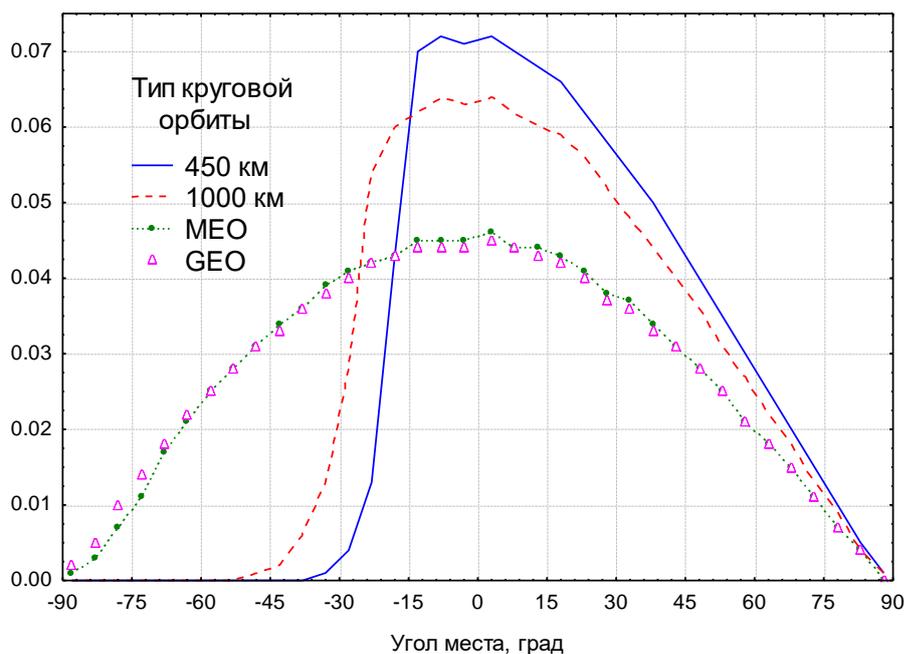


Рисунок 5 - Распределение возможных значений угла места

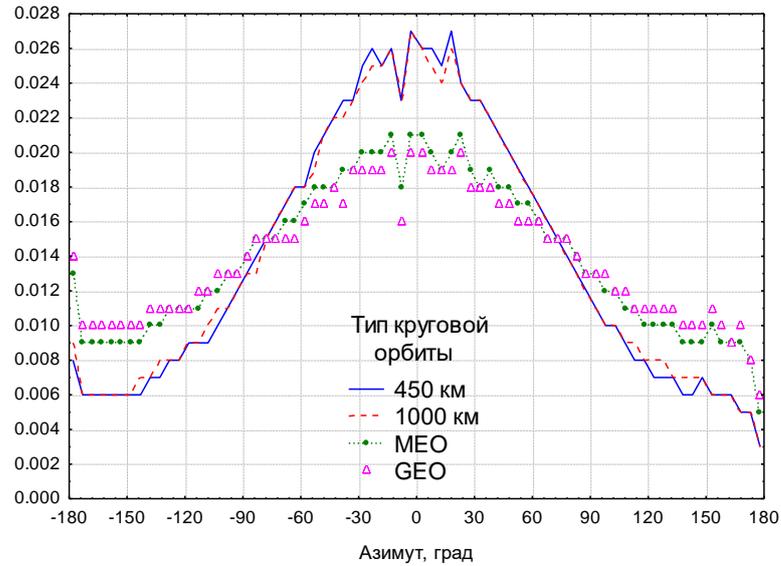


Рисунок 6 - Распределение возможных значений азимута

На рисунке 7 представлено статистическое распределение возможных значений относительной скорости частиц ($p(V_{rel})$) для КА на высоте 450 км, а на рисунке 6 – аналогичные распределения по данным отчета МККМ.

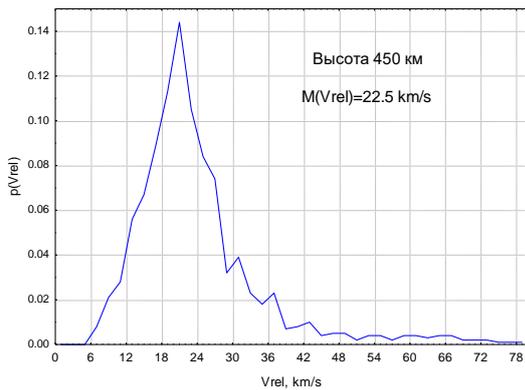


Рисунок 7 – Плотность распределения $p(V_{rel})$

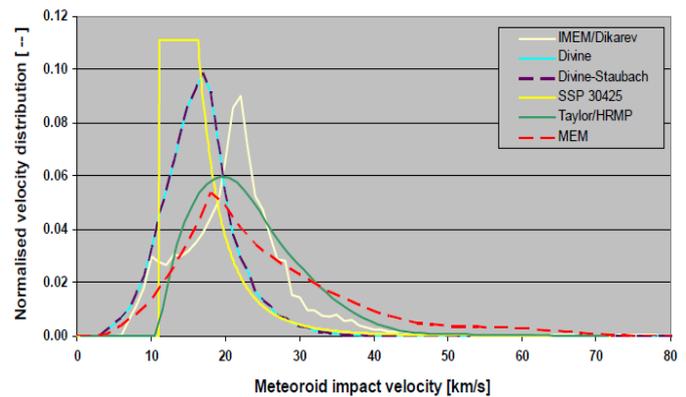


Рисунок 8 – $p(V_{rel})$ по данным МККМ

Третья глава содержит методы и алгоритмы расчета потоков космического мусора. Отличительной особенностью разработанных методов и алгоритмов является использование условных распределений КМ по баллистическим параметрам и отдельное моделирование различных групп объектов. Отдельно рассмотрены особенности техногенного засорения и его эволюции наиболее используемых областей ОКП: НОО, ГНСС, ГСО. Представлена верификация разработанных моделей по экспериментальным данным (возвращаемые поверхности из космоса и радиолокационные измерения малоразмерного КМ).

Отличительной особенностью методов и алгоритмов является суммирование вероятностей $\Delta\tau$, получаемых при расчете концентрации с использованием условных плотностей распределений величин орбитальных параметров $p(h_p), p(e|h_p), p(i|h_p)$.

$$P = \Delta\tau(h_p, e, i) p(h_p)p(e|h_p)p(i|h_p). \quad (8)$$

В таблице 3 представлены обобщенные данные о КМ и методах ограничения его образования, обобщенного представления количества и рисков.

Особенностью разработанных методов и алгоритмов является использование условных статистических распределений баллистических параметров КМ.

Сравнение разработанной модели с экспериментальными данными и последней, самой актуальной версией модели НАСА - ORDEM 3.2 представлено на рисунке 9.

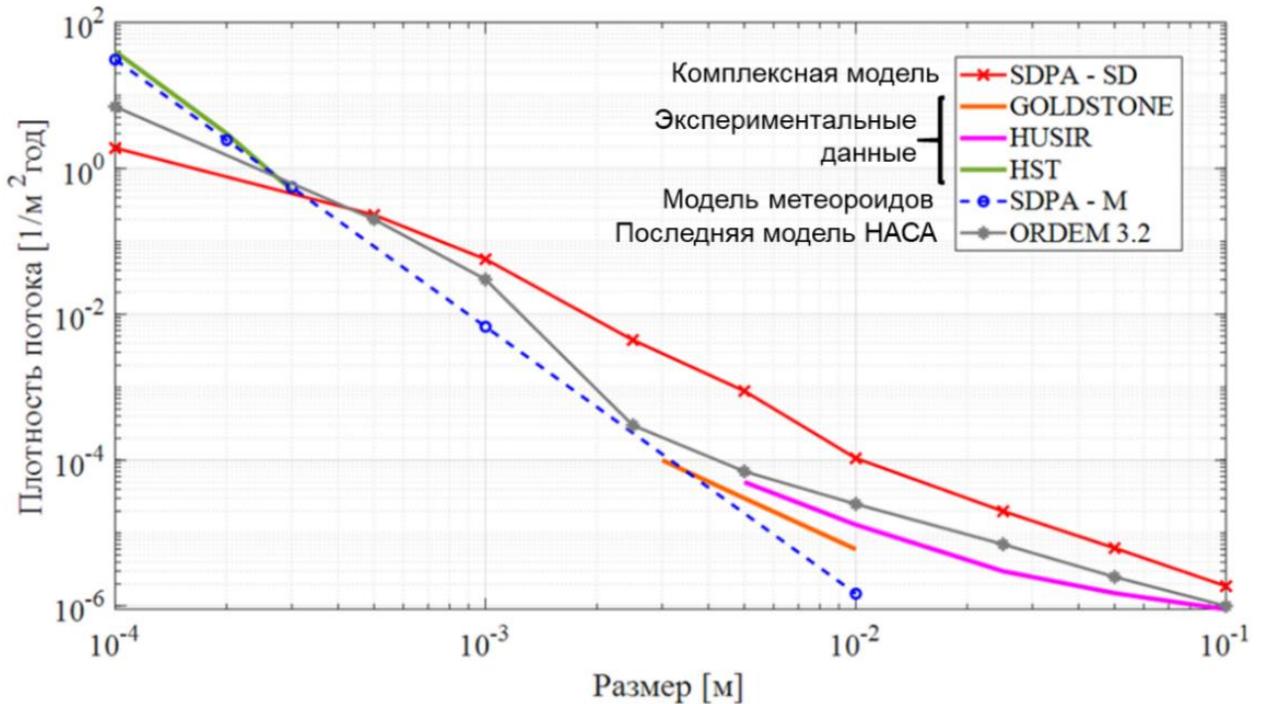
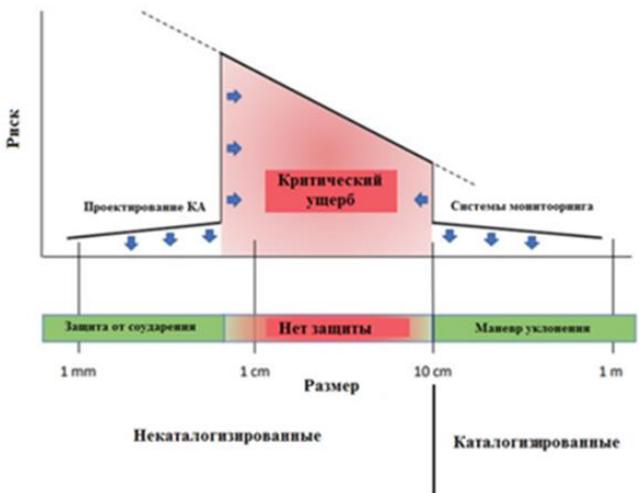


Рисунок 9 – Сравнение потоков КМ по актуальным на 2022 г. моделям и экспериментальным данным

Как видно из рисунка 9, максимальное отличие разработанной модели космического мусора (обозначена красной линией на графике) от модели НАСА не превышает 0,5 порядка. Наилучшее соответствие между моделями и экспериментальными данными достигается в областях размеров, где проводились измерения. Наибольшие отличия находятся в области размеров, где отсутствуют измерения КМ, что признано ведущими космическими агентствами и является приоритетной научно-технической задачей получения этих экспериментальных данных. В данной области различие подходов аппроксимации между отечественной моделью и моделью НАСА заключается в сохранении общей степенной зависимости изменения количества объектов по мере уменьшения размеров. В модели НАСА постарались сгладить данную зависимость между точками с доступными экспериментальными данными.

Таблица 3 – Обобщенные данные о космическом мусоре

По причине образования			По возможности каталогизации и рискам			
Категория	Причины образования	Рекомендации	Категория КО	Размеры [см]	Оценка количества	Потенциальный риск столкновения с КА
Объекты, связанные с выполнением миссий	Объекты, образованные преднамеренно	Разработка РКТ с использованием мер смягчения техногенного засорения	Каталогизируемые	> 5-30	~ 45000	Полная потеря работоспособности
	Объекты образованные непреднамеренно	Разработка РКТ с большей надежностью	Потенциально каталогизируемые	1 - 10	~ 10 ⁶	Полная или частичная потеря работоспособности
Фрагменты	преднамеренное разрушение	Воздержание от преднамеренных разрушений	Некаталогизируемые	< 1	~ 10 ⁹	Ухудшение свойств отдельных систем
	Самопроизвольные взрывы во время функционирования	Разработка РКТ с большей надежностью				
	Разрушения после прекращения функционирования	Разработка РКТ с использованием мер смягчения техногенного засорения				
	Столкновения на орбите	Предупреждение столкновений и экранирование				
Прекратившие существование КА, РБ и ступени РН	Недостаточный маневр увода или его отсутствие	Проведение маневра увода в атмосферу или на не используемую орбиту захоронения				

С учетом того факта, что экспериментальные данные получены с низким пространственным и временным разрешением, можно считать экспериментальные

оценки потоков заниженными относительно реальных средних значений. В связи с этим и по анализу уточнения модели НАСА с ORDEM 3.0 до ORDEM 3.2, в результате которого оценки по ней увеличиваются и приближаются к принятой в новой модели аппроксимации, можно сказать, что принятые решения и новая модель космического мусора является адекватной и верифицированной по доступным экспериментальным данным. Сравнение количества объектов в каталоге с прогнозируемым количеством КО по разработанным методам и алгоритмам представлено на рисунке 10, видно хорошее совпадение результатов моделирования с реальными данными. Небольшие отличия, с учетом того факта что часть объектов не каталогизируется или теряется с сопровождения, существенно не влияют на результаты оценки.

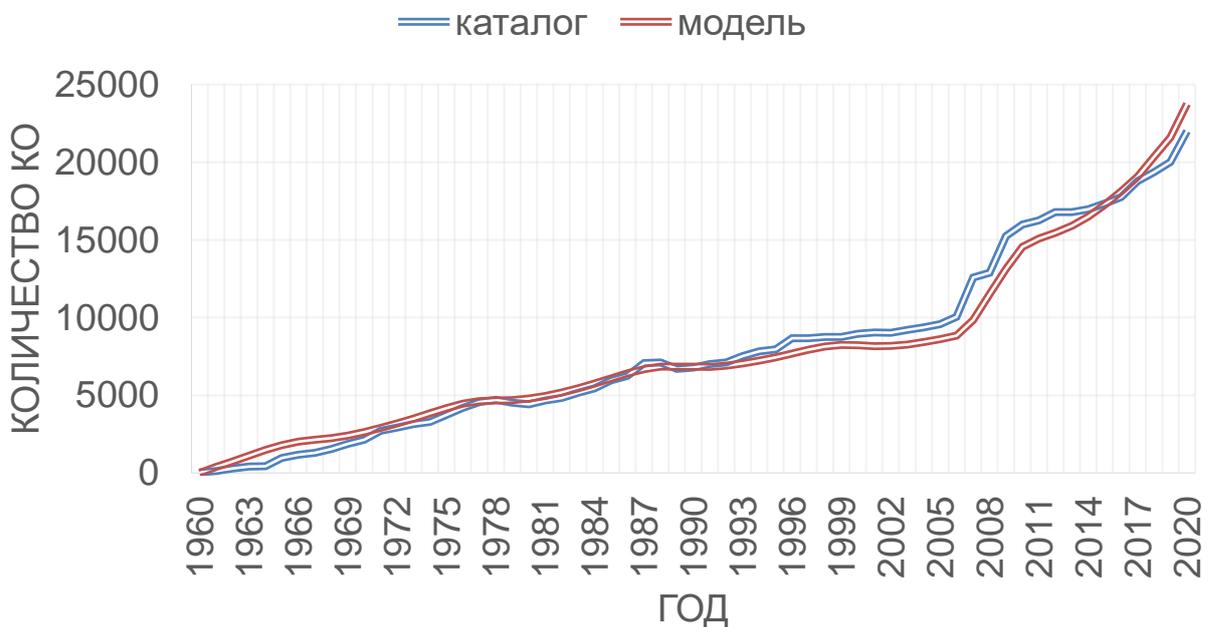


Рисунок 10 - Сравнение модельных и реальных данных

На рисунке 11 и рисунке 12 представлены результаты прогнозирования каталогизированных КО и КО размером 0,01-0,025 мм до 2050 года при сценарии, учитывающем существующие интенсивности запусков КА и развертывания больших орбитальных группировок (ОГ). При этом учитывается, что после 2022 года интенсивность развертывания КА на орбитах высотой 550 км снизится, а интенсивность развертывания группировок КА на орбитах высотой ~1100 км сохранится. Данный факт развертывания хорошо виден в представленных далее распределениях концентрации КО размером 0,01-0,025 мм, где с 2021 по 2050 гг. существенно увеличилось количество КО в диапазоне высот 1100 км. Данный диапазон высот 1100-1200 км ввиду очень маленькой плотности верхней атмосферы за исследуемое время практически не очищается от КО естественным образом.



Рисунок 11 - Прогноз каталогизированных КО с учетом существующих тенденций

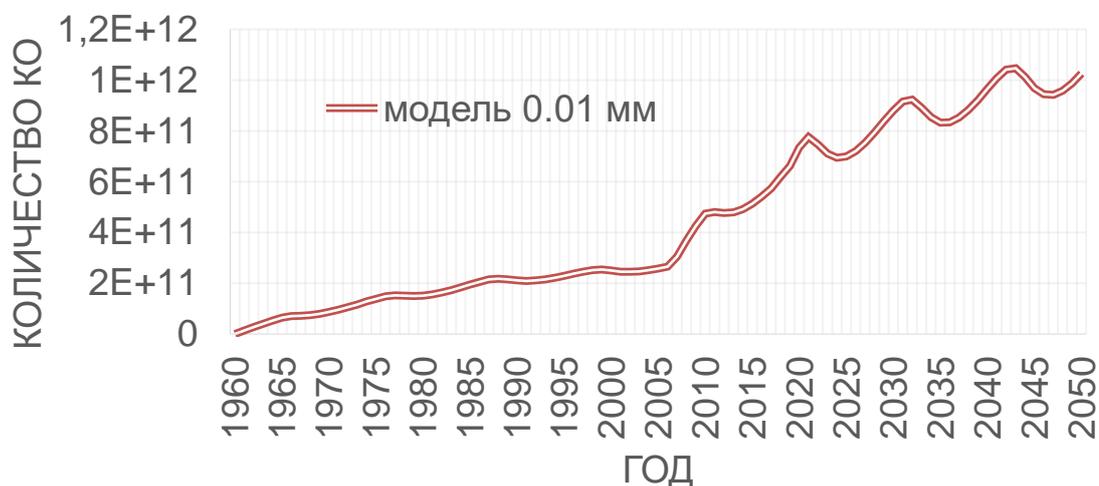


Рисунок 12- Прогноз КО размером 0.01-0.25 мм

Колебания на графиках изменения количества КО объясняются 11- летним циклом солнечной активности и для малоразмерной фракции в целом имеют большую амплитуду, что связано с большими величинами отношения площади к массе, в результате чего они быстрее тормозятся в атмосфере и сгорают.

На рисунке 13 представлена нормированная по максимальному значению зависимость концентрации каталогизированных КО в 2022 году. На графике видны новые локальные максимумы, образованные от развернутой орбитальной группировки КА Starlink, запуска малых космических аппаратов, развертывания орбитальной группировки OneWeb. В сравнении с аналогичной зависимостью 2017 года появились, представленные выше три локальных максимума. В сравнении с аналогичной зависимостью для КО размером 0.01-0.025 см (рисунок 14) каталогизированные КО распространены в пространстве более локально, малоразмерная фракция КО – более сглажено.

При прогнозе малоразмерной фракции до 2050 года (рисунок 15) максимальное значение практически не изменяется, однако появляется существенный локальный максимум в области высот 1100 км, в области более низких высот объекты чуть больше размазываются по высотам.

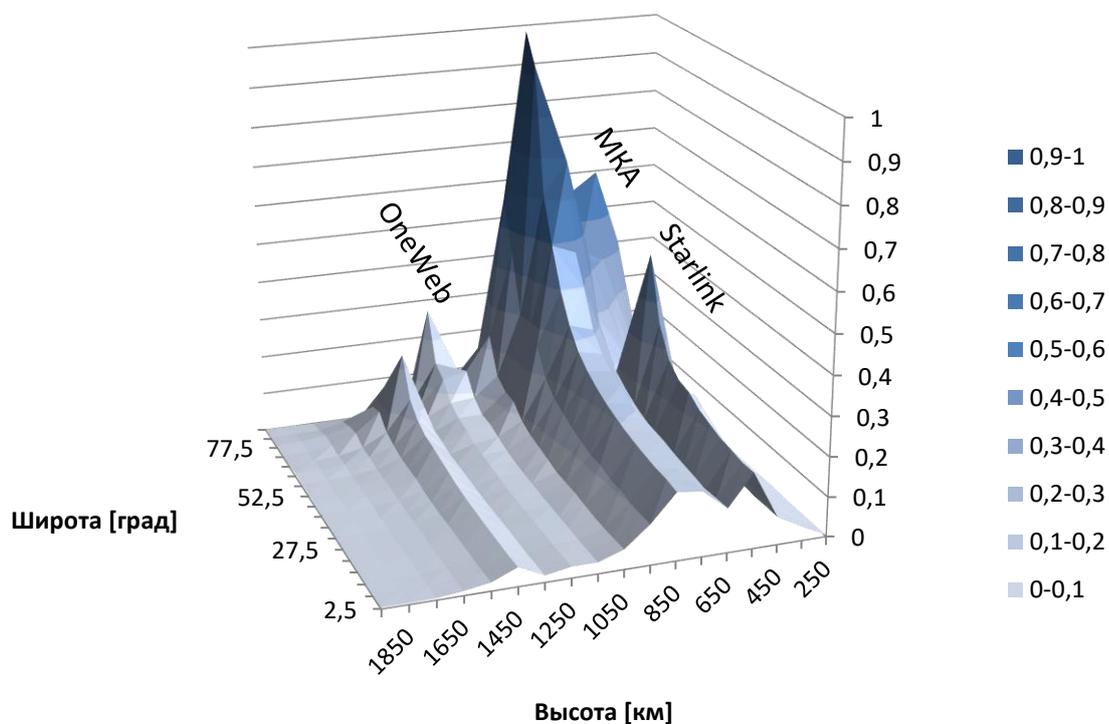


Рисунок 13 – Нормированная концентрация каталогизированных КО на начало 2022 года. Максимальное значение $1.797 \cdot 10^{-7} [1/\text{км}^3]$

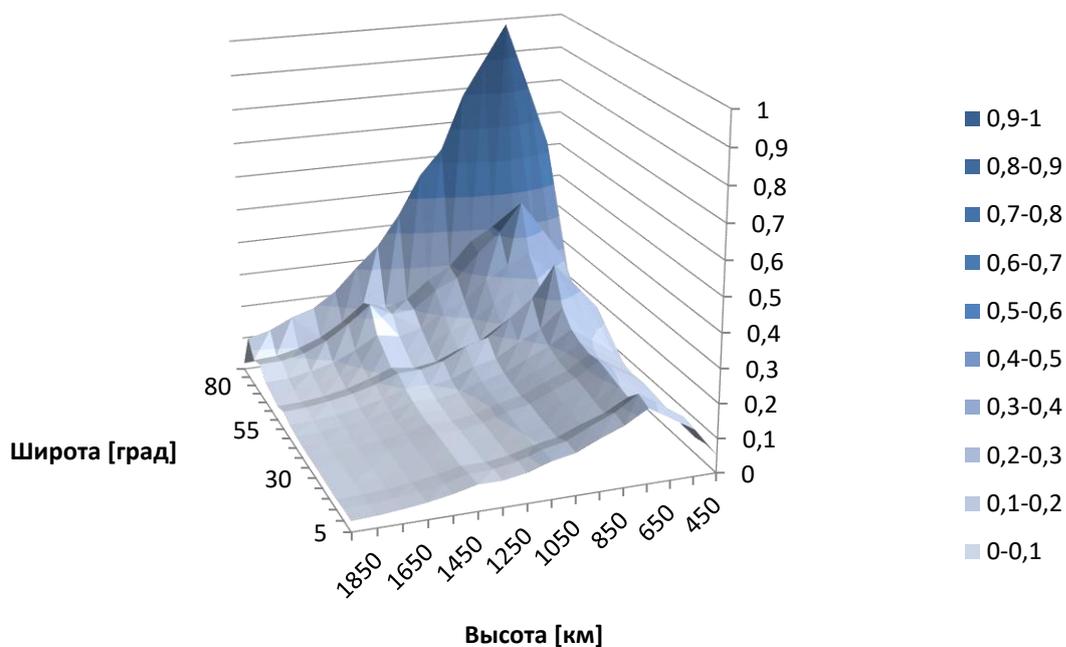


Рисунок 14 - Нормированная концентрация КО размером 0.01-0.025 см на 2022 г. Максимальное значение $3.987 [1/\text{км}^3]$

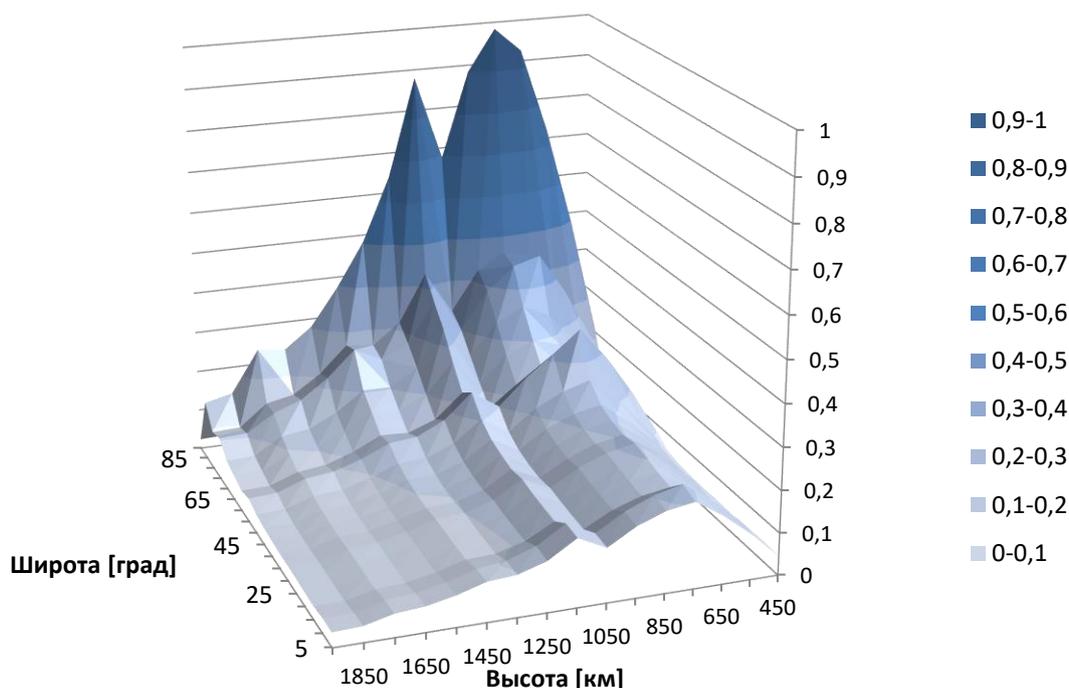


Рисунок 15 - Нормированная концентрация КО размером 0.01-0.025 см при прогнозе на 2050 г. Максимальное значение 3.95 [1/км³]

В целом в прогнозах зависимостей малоразмерной фракции КМ наблюдается рост, пропорциональный интенсивности космической деятельности, однако производная этого роста меньше, чем у каталогизированных объектов, что связано с большим воздействием верхней атмосферы на КО. Максимальные значения концентрации в области НОО практически не изменяются, что не приводит к существенному увеличению количества потенциальных столкновений.

Четвёртая глава содержит результаты применения разработанных методик и алгоритмов для решения прикладных задач обеспечения безопасности космических полетов, связанных с оценкой плотностей потоков частиц и вероятностей столкновения с КМ и метеороидами для перспективных изделий ракетно-космической техники, таких как ракеты-носители легкого, среднего и тяжелого классов (рисунок 16), перспективная Российская орбитальная станция (рисунок 17), отлетные траектории КА и др., а также содержит оценку долговременной эволюции КМ при различных условиях осуществления космической деятельности для различных сценариев, учитывающих катастрофические разрушения и интенсивные запуски космических аппаратов. Показаны условия, при которых возможно образование новых максимумов засорения, а также соответствие результатов моделирования историческим данным. Разработаны обоснованные предложения по составу системы мониторинга некаталогизируемого КМ и оценки возможности его активного

удаления. Выделены области для активного удаления крупных объектов КМ (рисунок 18).

Расчеты выполнены с использованием формулы для расчета потока Q_j , [$\text{м}^2 \cdot \text{год}^{-1}$] и вероятности столкновения для КО различных диапазонов размеров относительно КА или РБ/ступени простой формы определяют по формулам:

$$Q_j = S Q(H_{\text{п}}, e, i, t)_j \quad (9)$$

$$P(N_{(t_k, t_{k+n})}) = 1 - \exp(-Q_j). \quad (10)$$

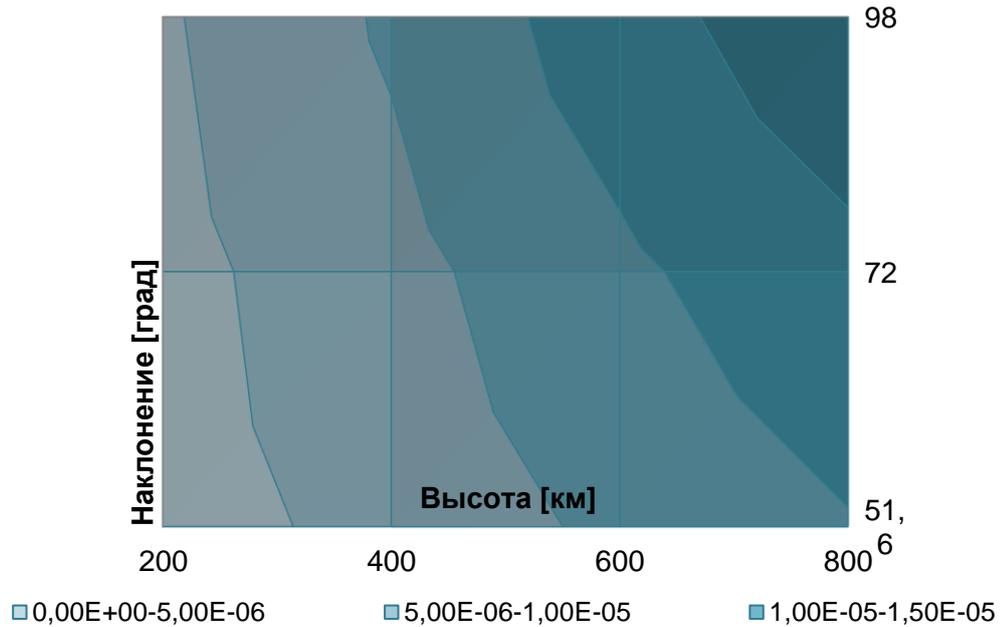


Рисунок 16 - График зависимости вероятности столкновения РН среднего класса с КМ размером более 1 см на этапе выведения в зависимости от высоты и наклона целевой орбиты

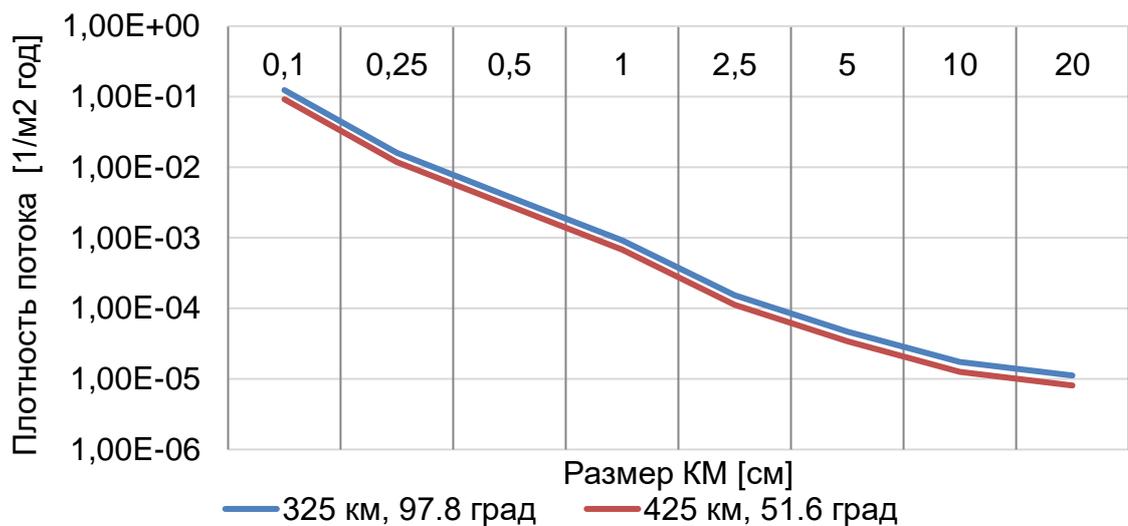


Рисунок 17 - Графики зависимости плотностей потока КМ для вариантов орбит в зависимости от размера

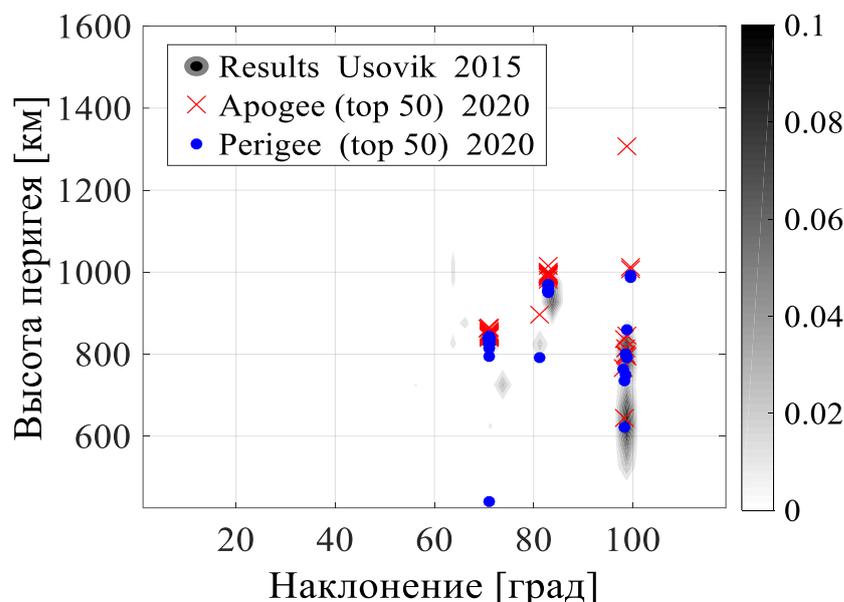


Рисунок 18 – Сравнение областей для активного удаления (выделены тёмным) и 50 объектов определённых международной группой экспертов

Пятая глава содержит описание общей методики оценки вероятности критического столкновения с космическим мусором и метеороидом. Критическим столкновением будем считать высокоскоростное столкновение КА или его подсистем и элементов, площадь которых можно ограничить заданной величиной критической площади $S_{кр}$, с частицей космического мусора или метеороидом, кинетическая энергия которой превышает пороговое значение $E_{кр}$, при заданной массе m и относительной скорости столкновения V_{rel} , в результате которого КА теряет основные функциональные возможности или полностью выходит из строя. Примерами таких столкновений являются: выход из строя в 2013 году КА Блиц, который представлял собой отражающую сферу, которая после столкновения перестала отражать лазерное излучение, выход из строя герметичных КА по причине разгерметизации в результате столкновения, выход из строя в 2022 году пилотируемого корабля Союз-МС 22, в результате чего стало невозможно возвращение экипажа с МКС после пробоя системы терморегулирования.

Общая методика состоит в следующем: для заданной орбиты КА - a, e, i, w, Ω и срока активного существования t_{cac} по моделям КМ и метеороидов определяются потоки частиц $Q^{\square}(m(d_j), a, e, i, w, \Omega, t_{cac})$ для принятых 11 диапазонов размеров и масс, определяемых через заданную среднюю плотность, а также распределения относительной скорости столкновения $P(V_{rel}^{\square})$. Из совокупности потока КМ и метеороидов выбирается поток $Q_{кр}(t)$, который способен вывести из строя КА, при условии $\frac{m(d_j)V_{rel}^{\square 2}}{2} > E_{кр}$. После того как такой поток определен, рассчитывается

вероятность столкновения для данного потока. На рисунке 14 представлена общая схема методики, результаты расчетов для типовых орбит в таблице 4.

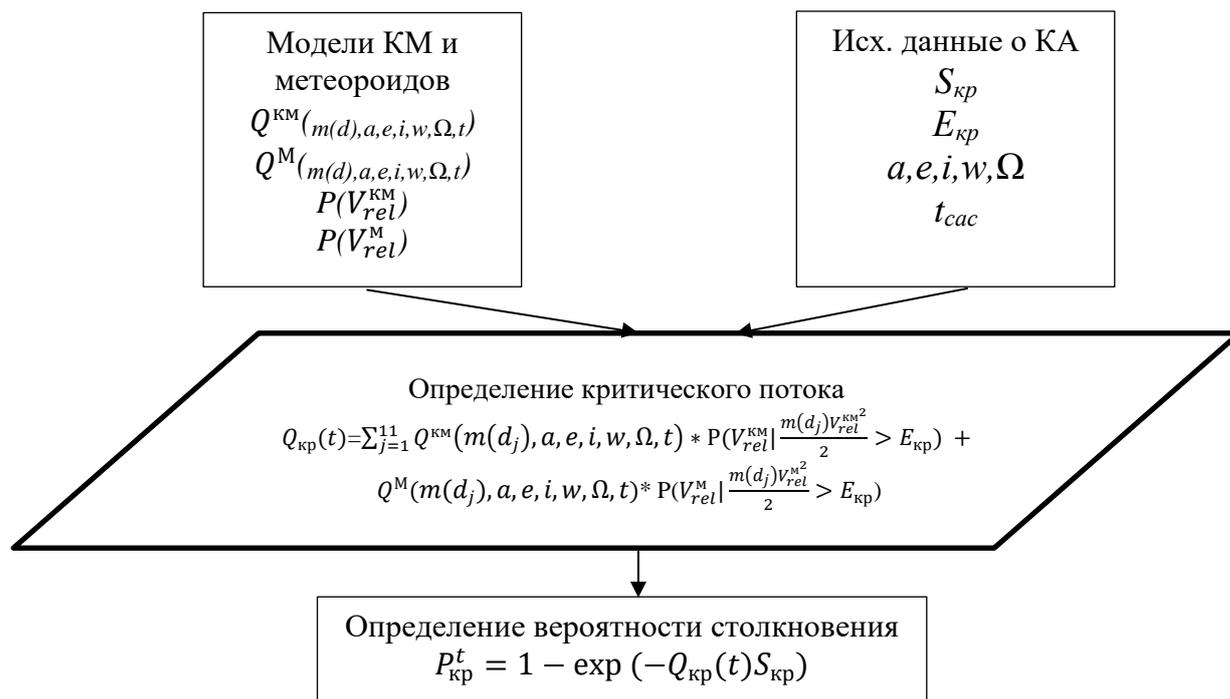


Рисунок 19 – Схема общей методики оценки вероятности выхода из строя в результате столкновения с КМ или метеороидом

Таблица 4 – Оценка вероятностей критического столкновения за 5 лет для КА на типовых орбитах

Орбита/ $E_{кр}$	40	100	200	400	1000
<i>МКС</i>	0,466	0,105	0,091	0,079	0,040
<i>ССО</i>	0,990	0,866	0,856	0,832	0,253
<i>ВЭО</i>	0,194	0,052	0,049	0,045	0,034
<i>ГЛОНАСС</i>	0,039	0,032	0,030	0,029	0,020
<i>ГСО</i>	0,032	0,012	0,011	0,010	0,008

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе поставлена и решена актуальная научная проблема информационного обеспечения безопасности осуществления космических операций за счет оценки плотностей потоков КМ и метеороидов в ОКП, а также прогнозирования техногенного засорения ОКП.

Разработано методы и алгоритмы, а также математическое и алгоритмическое обеспечение позволяющие оценивать влияние активного удаления на эволюцию КМ и выявлять области для первоочередной реализации активного удаления, оценить влияние изменившихся условий осуществления космической деятельности на техногенное засорение ОКП, решить ряд прикладных

задач оценки потоков КМ и метеороидов для различных космических миссий на различных этапах космического полета.

Для решения упомянутых задач получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1) формализация задач системного анализа проблемы космического мусора и моделирования потоков космического мусора и метеороидов;

2) методы и алгоритмы расчета характеристик потока спорадических метеороидов в ОКП, отличающиеся использованием нового метода учёта гравитационного эффекта, для формирования информационного обеспечения безопасности проведения космических операций при принятии решений на этапе проектировании космических аппаратов;

3) методы и алгоритмы расчета характеристик потока КМ, основанные на условных статистических распределениях орбитальных параметров и характеристик, для формирования информационного обеспечения безопасности проведения космических операций при принятии решений на этапе проектировании космических аппаратов;

4) комплекс алгоритмов для прогнозирования техногенного засорения ОКП при реализации мер ограничения образования и активного удаления КМ, основанной на статистических методах и алгоритмах, а также раздельном моделировании групп объектов, для подготовки исходных данных при принятии управленческих решений в области технологий ограничения и снижения техногенного засорения ОКП.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что:

1) получены характеристики плотностей потока КМ в ОКП и для КА на различных орбитах при различных сценариях осуществления КД, задающие условия функционирования КСр, на основании которых разработан и введён в действие государственный стандарт ГОСТ Р 25647.167 – 2022 «Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве»;

2) разработана архитектура и реализация программно-алгоритмического обеспечения расчета текущих и прогнозируемых характеристик потока КМ и метеороидов которое используется в организациях, проектирующих КСр;

3) разработаны предложения по использованию оценок потоков КМ и метеороидов в прикладных задачах при проектировании средств выведения и космических аппаратов, а также для принятия управленческих решений по мерам и требованиям ограничения техногенного засорения ОКП на основе результатов долгосрочного прогнозирования потоков КМ.

Для валидации полученных результатов проведены расчеты и сравнение по исходным данным Межагентского координационного комитета по космическому мусору с аналогичными результатами зарубежных специалистов, с доступными экспериментальными данными с возвращаемых поверхностей из космоса и радиолокационных измерений малоразмерного КМ. Данное сравнение показало, что разработанные модели, методики и программно-математическое обеспечение не уступают зарубежным аналогам, а также существенно превосходят их по быстродействию.

Анализ плотностей потоков метеороидов по разработанным методам и алгоритмам показал увеличение плотности потока за счет учета гравитационного эффекта по направлению, а также необходимость учёта метеороидных потоков для всех космических операций, как фактора способного приводить к функциональным нарушениям функционирования КСр.

Исходя из анализа данных о плотностях потоков КМ разных размеров и ее эволюции, воздействие со стороны КМ будет наименьшим для следующих околокруговых орбит в области НОО:

- а) 600-700 км, наклонение до 70^0 ;
- б) 900 – 1100 км, наклонение любое;
- в) 1600 – 2000 км, наклонение любое.

Анализ результатов оценки влияния активного удаления космического мусора на долгосрочную эволюцию техногенного засорения области низких околоземных орбит при различных сценариях показал, что для стабилизации и снижения техногенного засорения области низких околоземных орбит необходимо, помимо соблюдения мер по ограничению техногенного засорения, удалять 5 крупных объектов в год с наибольшим значением произведения массы на вероятность столкновения. Были выделены 3 области по высоте перигея и наклонению, для которых активное удаление наиболее актуально в ближайшем будущем:

- а) $h_n = 800-850$ км, $i = 71,25^0$;
- б) $h_n = 650-800$ км, $i = 98,75^0$;
- в) $h_n = 900-950$ км, $i = 83,75^0$.

Представленные результаты оценки показали, что запуски МКА на высоты, со сроком баллистического существования менее 25 лет, с учетом постоянного увеличения их количества не оказывают существенного влияния на техногенное засорение области НОО. Развертывание больших ОГ приводит к постепенному накоплению неуведенных КА в диапазоне высот, где воздействие атмосферы является слабым.

Результаты научных исследований и инновационных разработок уже применяются при проектировании Российской орбитальной станции и космических аппаратов, позволяя обеспечить безопасность осуществления космических операций и долгосрочную устойчивость космической деятельности Российской Федерации.

Списки работ, опубликованных автором по теме диссертации **Собственные работы автора**

1. Усовик И.В. Системный анализ проблем космического мусора [Текст] / И.В. Усовик // Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – М.: Изд-во МАИ, 2023. – 88 с.: ил. – ISBN 978-5-4316-1024-0.

2. Усовик, И.В. Прогнозирование техногенного засорения низких околоземных орбит [Текст] / И.В. Усовик // Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – М.: Изд-во МАИ, 2023. – 96 с.: ил. – ISBN 978-5-4316-1025-7.

3. Усовик, И.В. Предложения по внедрению перспективных методов и технических решений ограничения образования космического мусора в отечественной ракетно-космической технике [Текст] / И.В. Усовик // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 7. – С. 53-60. – ISSN 2079-5920.

4. Усовик И.В. Предложения по внедрению перспективных методов ограничения образования космического мусора в отечественной ракетно-космической технике // Space Flight Safety X International simposium, 30 мая - 3 июня 2023 г. - СПб: ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг», 2023. – С. 24.

5. Usovik I.V. Perspective of non-catalogued space debris removal and monitoring. [Текст] / I.V. Usovik // Acta Astronautica. – 2024 – Vol. 215 (2024). – P. 471-474.

6. Usovik I.V. Review of perspective space debris mitigation solutions [Текст] / I.V. Usovik // Journal of Space Safety Engineering. – 2023. – V. 10, Issue 1, March. – P. 55-58.

7. Усовик, И.В. Развитие методов математического моделирования космического мусора в обеспечение решения задач ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства [Текст] / И.В. Усовик // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 7. – С. 53-60. – ISSN 2079-5920.

8. Усовик И.В. Обзор и анализ перспективных методов ограничения образования космического мусора. [Текст] / И.В. Усовик // Space Flight Safety IX International simposium, 17 - 21 мая 2022 г. - СПб: ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг», 2022. – С. 20.

9. Усовик, И.В. Состояние и прогноз техногенного засорения околоземного космического пространства [Текст] / И.В. Усовик // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции ученых и специалистов, посвященная 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия», ПАО РКК "Энергия" 13-17 сентября 2021 – ПАО РКК «Энергия», 2021. – С. 491.

10. Усовик, И.В. Анализ вклада малых космических аппаратов в текущее состояние техногенного засорения области низких околоземных орбит [Текст] / И.В. Усовик // Авиация и космонавтика: Тезисы 20-ой Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021 года. – М.: Издательство «Перо», 2021. – С. 370-371.
11. Усовик, И.В. Математическое моделирование космического мусора и метеороидов для решения прикладных задач космонавтики [Текст] / И.В. Усовик // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – М.: Издательство «Перо», 2020. – С. 501.
12. Усовик, И.В. Тенденции решения проблем, связанных с техногенным засорением околоземного космического пространства [Текст] / И.В. Усовик // Тезисы докладов научно-практической конференции "Космонавтика и ракетостроение: взгляд в будущее", 12-13 мая 2016 г. - Королев: ЦНИИмаш, 2016. – С. 20.
13. Усовик И.В. Методические особенности отечественной модели космического мусора [Текст] / И.В. Усовик // IV Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов Центра управления полетами. Сборник статей. (Королев, Московской обл., 5-8 апреля 2016). – М.: ЦНИИмаш, 2016. – С. 244-249.
14. Усовик, И.В. Системный анализ проблемы засорения космического пространства [Текст] / И.В. Усовик // Фундаментальные проблемы системной безопасности: материалы III школы-семинара молодых ученых: в 2 частях, Елец, 26–28 мая 2016 года. Том Часть II. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2016. – С. 150-154.
15. Усовик, И.В. Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01: защищена 24.12.2015: утв. 10.08.2016 / Усовик Игорь Вячеславович. М., 2015. – 112 с.
16. Усовик, И.В. Системный анализ проблемы активного удаления космического мусора [Текст] / И.В. Усовик // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов XX международной научной конференции, Евпатория, 28 июня – 5 июля 2015 года. – Евпатория: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 43.
17. Усовик, И.В. Методика прогнозирования техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора [Текст] / И.В. Усовик // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов XIX международной научной конференции, Евпатория, 29 июня – 6 июля 2014 года. – Евпатория: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2014. – С. 29-30.
18. Усовик, И.В. Анализ характеристик потока космического мусора на низких околоземных орбитах с использованием уточненной модели [Текст] / И.В. Усовик // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – Выпуск № 3 (76). – С. 97-102. – ISSN: 1994-3210.
19. Усовик И.В. Методика прогнозирования техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического

мусора [Текст] / И.В. Усовик // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 18-21 ноября 2014 года. – СПб.: Мастерская печати, 2014. – С. 194.

20. Усовик И.В. Анализ распределений орбитальных параметров крупных космических объектов с использованием свободно распространяемой информации [Текст] / И.В. Усовик // 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», Москва, 12-15 ноября 2013 года. – СПб.: Мастерская печати, 2013. – С. 258-259.

Статьи в журналах Перечня ВАК РФ

21. Усовик И.В., Захарова А.П., Одинцов И.И. Анализ тенденций ограничения образования космического мусора // Космонавтика и ракетостроение. – 2024. – № 1(134). – С. 122-132.

22. Усовик И.В., Ключников В.Ю., Захарова А.П. Классификация и сравнительный анализ методов ограничения техногенного загрязнения околоземного космического пространства. // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 25-35.

23. Усовик И.В., Неплюев В.Е., Степанов Д.В. Развитие модели техногенного засорения околоземного космического пространства // Космонавтика и ракетостроение. – 2023. – № 4(133). – С. 54-66.

24. Усовик И.В. Морозов А.А. Обоснование необходимости создания и развития системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора. // Вестник московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 4. – С. 22-209.

25. Усовик И.В., Богатый А.В., Далабаев П.Б., Петрухин Б.М. Об опыте интеграции научных и образовательных учреждений в проектах по ограничению антропогенного воздействия на околоземное космическое пространство. // Космические аппараты и технологии. – 223 – Том 7 №2(44) – С. 153-161.

26. Усовик И.В., Назаренко А.И. Оптимальная фильтрация измерений – перспективный метод повышения точности оценок времени падения и вероятности столкновения космических объектов. // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Том 29, №3. – С. 140-148.

27. Усовик, И.В. Анализ трафика запусков, разрушений космических объектов и сходов с орбиты в период 2010-2021 гг. как основных составляющих эволюции космического мусора [Текст] / И.В. Усовик, А.П. Захарова, Д.В. Степанов, И.Б. Степанов // Космонавтика и ракетостроение. – 2022. – № 2 (125). – С. 99-111. – ISSN 1994-3210.

28. И.В. Усовик Построение модели эволюции объектов малоразмерной фракции космического мусора, образующегося в результате разрушений [Текст] / Г.К. Боровин, М.В. Захваткин, В.А. Степаньянц, И.В. Усовик // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2021. – № 75. – С. 1-27. – ISSN 2071-2898.

29. Усовик, И.В. Анализ разрушения и фрагментации космических аппаратов при высокоскоростных столкновениях [Текст] / И.В. Усовик, Н.Н. Смирнов, А.Б. Киселев, В.В. Тюренкова, А.И. Назаренко // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические

средства противодействия терроризму. – 2020. – № 11-12 (149-150). – С. 22-31. – ISSN 2306-1456.

30. Усовик, И.В. Управление космическим движением – новые вызовы отечественной космонавтике [Текст] / И.В. Усовик, В.С. Кисиленко, В.А. Марчук, Н.И. Стельмах, М.В. Яковлев // Космонавтика и ракетостроение. – 2019. – № 4 (109). – С. 67-79. – ISSN: 1994-3210.

31. Усовик, И.В. Выявление потенциально опасных космических объектов и сближений с сопровождаемыми космическими аппаратами [Текст] / А.И. Стрельцов, М.В. Захваткин, В.А. Воропаев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2019. – № 3. – С. 1-30. – ISSN 2071-2898.

32. Усовик, И.В. Статистическая модель распределения космических объектов в пространстве орбитальных параметров [Текст] / И.В. Усовик, Г.К. Боровин, М.В. Захваткин, В.А. Степаньянц // Математическое моделирование и численные методы. – 2019. – № 4 (24). – С. 69-90. – ISSN 2309-3684.

33. Усовик, И.В. Неустойчивость решения задачи об определении времени падения спутников на эллиптических орбитах [Текст] / И.В. Усовик, А.И. Назаренко // Вестник кибернетики. – 2018. – № 3 (31). – С. 82-90. – eISSN 1999-7604.

34. Усовик И.В., Молотов И.Е., Еленин Л.В., Крылов А.Н., и др. Анализ вклада сети НСОИ АФН в решение задач мониторинга космического мусора в области геостационарных орбит. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 274. С. 1-14.

35. И.В. Усовик. Статистическая модель распределения космических объектов в пространстве орбитальных параметров [Текст] / Г.К. Боровин, М.В. Захваткин, В.А. Степаньянц, И.В. Усовик // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2018. – № 85. – С. 1-16. – ISSN 2071-2898.

36. Усовик, И.В. Бесконтактный вывод объектов космического мусора из защищаемой области геостационарной орбиты [Текст] / И.В. Усовик, С.С. Логинов, М.В. Яковлев, В.А. Обухов, Г.А. Попов и др. // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 5 (98). – С. 28-36. – ISSN 1994-3210.

37. Усовик, И.В. Перспективы развития орбитального обслуживания [Текст] / И.В. Усовик, А.П. Дублева, А.Н. Мальченко, Д.В. Степанов, М.В. Яковлев // Космонавтика и ракетостроение. – 2017. – № 6 (99). – С. 11-22. – ISSN 1994-3210.

38. Усовик, И.В. Определение рациональной орбиты малого космического аппарата, предназначенного для мониторинга объектов космического мусора в области ГСО [Текст] / И.В. Усовик, В.М. Агапов, К.С. Ёлкин, В.А. Емельянов, Ю.К. Меркушев, Р.П. Рамалданов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – Т. 14. – № 4-3. – С. 7-13. – ISSN 1729-5459.

39. Усовик, И.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора [Текст] / И.В. Усовик, В.В. Мальшев, В.В. Дарнопых // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Том 22, № 3. – С. 54-62. – ISSN: 0869-6101.

40. Усовик, И.В. Актуальные вопросы международной стандартизации в рамках решения проблемы техногенного засорения околоземного космического пространства [Текст] / И.В. Усовик, А.Е. Горлов, М.А. Михайлов, С.С. Логинов, М.А. Яковлев // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – Выпуск № 5 (84). – С. 101-106. – ISSN 1994-3210.

41. Усовик, И.В. Влияние активного удаления космического мусора на долгосрочное состояние техногенного засорения низких околоземных орбит [Текст] / И.В. Усовик, А.Е. Горлов // Космонавтика и ракетостроение. – 2015. – Выпуск № 5 (84). – С. 107-112. – ISSN: 1994-3210.

Статьи в изданиях в базах данных Scopus и Web of Science

42. Usovik I.V., Nazarenko A.I. Promissing method for improving the accuracy of estimates in space debris tasks – Optimal filtering of measurments.//Acta Astronautica - 2023, - vol.204, p.826-830.

43. Usovik I.V., Nazarenko A.I. Space debris in low earth orbits region: formation and reduction process analysis in past decade // Acta Astronautica. -2023. -Vol.194. -P. 383-389.

44. Usovik I.V. Obukhov V.A., Petukhov V.G., Popov G.A., Testoyedov N.A. etc. Control of a service satellite during its mission on space debris removal from orbits with high inclination by implementation of an ion beam method // Acta Astronautica. -2022. -Vol.194. - P. 390-400.

45. Usovik I.V., Obukhov V.A., Petukhov V.G., Popov G.A., Svitina V.V., Kirillov V.A., Testoyedov N.A. Problematic issues of spacecraft development for contactless removal of space debris by ion beam // Acta Astronautica. - 2021. - Vol. 181. P. 569-578.

46. Usovik I.V., Smirnov N.N., Kiselev A.B., Nazarenko A.I., Tyurenkova V.V. Physical and mathematical models for space objects breakup and fragmentation in hypervelocity collisions // Acta Astronautica. - 2020. Vol. 176. -P. 598-608.

47. Usovik I.V. Mironov V.V., Retrospective of the space debris problem. part 1. technogenic clogging of space and means of its control // Cosmic Research. -2020. -V. 58. № 2. - P. 92-104.

48. Usovik I.V., Nazarenko I. Instability of the solution of the problem on determining the reentry time of satellites on elliptic orbits // Acta Astronautica. - 2019. - V. 163, -P. 142-146.

49. Usovik I.V., Nazarenko I. The effect of parameters of the initial data updating algorithm on the accuracy of spacecraft reentry time prediction // Journal of Space Safety Engineering. - 2019. - V. 6. № 1. -P. 24-29.

50. Usovik I.V., Nazarenko A.I. Gravitation effect on a flux of sporadic micrometeoroids in the vicinity of near-Earth orbits // Acta Astronautica. - 2013 - Vol. 84(2013). - P. 153-160.

51. Usovik, I.V., Stelmakh, N.I., Yakovlev, M.V. International legal aspects of operations for active removal of space debris from near Earth outer space // AIP Conference proceedings : XLIII ACADEMIC SPACE CONFERENCE: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration, Moscow, Russia, 28 january – 01 february 2019 / Editors: Evgeny A. Mikrin, Dmitry O. Rogozin, Anatoly

A. Aleksandrov, Victor A. Sadovnichy, Igor B. Fedorov and Vera I. Mayorova. Vol. 2171. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 130017.

52. Usovik I., Makarov Y., Prokopchik A., Simonov M., Gorlov A., Yakovlev M. Major trends for space debris mitigation in near-earth space in the Russian Federation // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. – 68, Unlocking Imagination, Fostering Innovation and Strengthening Security. –2017.

53. Usovik I.V., Malyshev V.V., Darnopykh V.V., Saharov V.I. The method of predicting space debris in low-Earth orbits, taking into account mutual collisions and active debris removal // Congress Proceedings, 66th International Astronautical Congress (IAC), 12–16 October 2015, Jerusalem, Israel. – 2015.

54. **Монографии**

55. НИИ 88/ЦНИИмаш - 75 лет. Монография в двух книгах под редакцией С.В. Коблова. В 2 кн. Кн. 2 Перспективные направления работы института. – ЦНИИмаш. – 2022. –296 с.

56. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. (Издание 2-е, исправленное и дополненное) / Усовик И.В., Миронов В.В., Муртазов А.К. - Рязань: BookJet. – 2018 – 356 с.

57. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. / Усовик И.В., Миронов В.В., Муртазов А.К. - Рязань: BookJet. - 2017. – 352 с.

58. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.Г. Райкунова. Усовик И.В., Агапов В.М., Головкин А.В., и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.– 248 с.

Программы для ЭВМ

59. Усовик И.В. Назаренко А.И. Модель для прогнозирования и анализа космического мусора – Space debris prediction and analysis (SDPA). Программа для расчета исходных данных о состоянии техногенного засорения околоземного космического пространства. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018613786, 22.03.2018.

60. Усовик И.В., Степанов Д.В. Модель для прогнозирования и анализа космического мусора – Space debris prediction and analysis (SDPA). Программа для расчета потока метеороидов относительно КА на заданной орбите. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664690, 20.11.2018.

61. Усовик И.В., Степанов Д.В. Модель для прогнозирования и анализа космического мусора – Space debris prediction and analysis (SDPA). Программа для расчета потока космического мусора относительно КА на заданной орбите. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664690, 03.12.2018.

Патенты

62. Яковлев М.В., Архипов В.А., Логинов С.С., Усовик И.В., Дублева А.П., Марчук В.А. Способ защиты космического аппарата от столкновения с активно сближающимся объектом. Патент на изобретение RU 2678759 С1, 31.01.2019.

63. Архипов В.А., Яковлев М.В., Усовик И.В., Логинов С.С., Юраш В.С. Устройство для защиты космического аппарата от высокоскоростного ударного воздействия частиц космического мусора. Патент на изобретение RU 2680359 С1, 19.02.2019.

64. Усовик И.В., Емельянов В.А., Ёлкин К.С., Маслов В.В., Меркушев Ю.К., Бодрова Ю.С., Рамалданов Р.П. Способ обнаружения и контроля космического мусора вблизи геостационарной орбиты. Патент на изобретение RU 2684253 С1, 04.04.2019.

65. Усовик И.В., Яковлев М.В., Архипов В.А., Соколов В.И., Логинов С.С., Попкова Л.Б., Горлов А.Е. Устройство автоматической стыковки космических аппаратов в операциях орбитального обслуживания. Патент на изобретение RU 2669763 С1, 15.10.2018.

Другие публикации

66. ГОСТ Р 25645.167-2022 «Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве». Усовик И.В., Степанов Д.В., и др.

67. Усовик И.В., Морозов А.А. Создание системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора. // Авиация и космонавтика: Тезисы 22-ой Международной конференции, Москва, 20-24 ноября 2023 года. - Москва: Издательство "Перо", 2023. - С. 231-232.

68. Усовик И.В., Степанов Д.В. Разработка новой отечественной модели космического мусора. // Сборник тезисов «Международная конференция Авиация и космонавтика». - М.: Издательство «Перо», 2022. - С. 126-127.

69. Усовик, И.В. Оценка возможности прогноза столкновения спутников. [Текст] / А.И. Назаренко И.В. Усовик // Space Flight Safety IX International simposium, 16 - 20 мая 2023 г. - СПб: ООО «Первый издательско-полиграфический холдинг», 2022. – С. 12.

70. Усовик И.В., Миронов В.В., Муртазов А.К. Библиографическое исследование по проблеме мониторинга околоземного космического пространств. 14 (Статьи 1-7) // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2019: Сборник трудов II международного научно-технического форума: в Ю т., Рязань, 27 февраля-01 марта 2019 года/Под общ. ред. О.В. Миловзорова. Том 5. - Рязань: Издательство «BookJet», 2019. - С. 57-90.

71. Построение оптимальной траектории увода объектов космического мусора из защищаемой области геостационарной орбиты. // Идеи К.Э. Циолковского в контексте современного развития науки и техники. Материалы 53-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. 2018. С. 120-121.

72. Usovik, I. Improvement of space debris model in MEO and GEO regions according to the catalog of Keldysh institute of applied mathematics (Russian academy of sciences) [Текст] / I. Usovik, M. Zakhvatkin, D. Stepanov [etc.] // Proceedings of the Seven European Conference on Space Debris. – Darmstadt, Germany, 2017.

73. Usovik, I. Major trends for mitigation of space debris in near-Earth space in the Russian Federation [Текст] / I. Usovik, Y. Makarov, M. Simonov [etc.] // Proceedings of the Seven European Conference on Space Debris. – Darmstadt, Germany, 2017.

74. Усовик И.В., Макаров Ю.Н., Симонов М.П., Степанов Д.В. Влияние запуска большого количества малых космических аппаратов и больших орбитальных группировок на техногенное засорение околоземного космического пространства. // Седьмой белорусский космический конгресс: Материалы конгресса: в 2-х томах, Том 1. Минск, 24-26 октября 2017 года. - Минск: Государственное научное учреждение "Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси", 2017. - ISBN 978-985-6744-96-2. - С. 20-24.

75. Усовик, И.В. Техногенное засорение области функционирования глобальных навигационных спутниковых систем [Текст] / И.В. Усовик, Е.И. Игнатович, С.А. Каплев // Фундаментальные проблемы системной безопасности : Материалы школы-семинара молодых ученых, посвященной 60-летию запуска первого в мире искусственного спутника Земли, Севастополь, 13-15 сентября 2017 года. – Севастополь: Цифровая полиграфия, 2017. – С. 126-129.

76. Назаренко, А.И. Отечественная модель космического мусора, текущее состояние и долгосрочный прогноз техногенного засорения [Текст] / А.И. Назаренко, И.В. Усовик // XLI Академические чтения по космонавтике : Сборник тезисов чтений, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, 24–27 января 2017 года. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 311.

77. Usovik, I.V. The last results of activity Russian Federation in the field of modeling space debris and space debris mitigation measures in the near-earth space [Текст] / I.V. Usovik, S.S. Loginov, M.A. Mikhailov, M.V. Yakovlev // 65-th International Astronautical Congress. – Toronto, Canada, 2014.

78. Usovik, I.V. The Analysis of Pollution of a Space in the Field of LEO at Various Scenarios of its Further Development [Текст] / I.V. Usovik, A.I. Nazarenko // Proceedings of the Six European Conference on Space Debris. – Darmstadt, Germany, 2013.

79. Usovik, I.V. Space Debris Evolution Modeling with Allowance for Mutual Collisions of Objects Larger than 1 cm in Size [Текст] / I.V. Usovik, A.I. Nazarenko // Proceedings of the Six European Conference on Space Debris. – Darmstadt, Germany, 2013.

80. Usovik, I.V. Gravitation effect on a flux of sporadic micrometeoroids in the vicinity near-Earth orbits [Текст] / I.V. Usovik, A.I. Nazarenko // Proceedings of the Six European Conference on Space Debris. – Darmstadt, Germany, 2013.

*Автор выражает искреннюю благодарность своим наставникам:
Назаренко А.И., Малышеву В.В., Яковлеву М.В., Бобронникову В.Т.*