

На правах рукописи



Усовик Игорь Вячеславович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ
ТЕХНОГЕННОГО ЗАСОРЕНИЯ НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ ПРИ
РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНОГО УДАЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

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

Научный руководитель: Малышев Вениамин Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системный анализ и управление» МАИ.

Официальные оппоненты: Вениаминов Станислав Сергеевич - д.т.н., проф., старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института войск воздушно-космической обороны (ЦНИИ ВВКО) Министерства обороны Российской Федерации, член экспертной рабочей группы по космическим угрозам при Совете РАН по космосу (секция "космический мусор").

Клишин Александр Федорович - к.т.н., заместитель начальника отделения ФГУП НПО им. С.А.Лавочкина, член экспертной рабочей группы по космическим угрозам при Совете РАН по космосу (секция "космический мусор").

Ведущая организация: Институт космических исследований Российской академии наук. 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

Защита состоится « 24 » декабря 2015 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

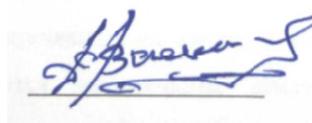
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=61344

Автореферат разослан « » 2015 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 125993, г. Москва, ГСП-3, А-80, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.12, к.т.н., доцент



В.В. Дарнопых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Космические аппараты (КА) стали неотъемлемой частью нашей жизни. С их использованием мы получаем услуги связи, метеорологическую информацию, проводим научные исследования и обеспечиваем национальную безопасность. Реальное и всё более возрастающее беспокойство относительно безопасности и надёжности этих аппаратов вызывает угроза их столкновения с космическим мусором (КМ).

За последнее десятилетие произошел значительный скачок засоренности области низких околоземных орбит (НОО) (до 2000 км), связанный с двумя катастрофическими событиями:

1) преднамеренное разрушение китайского спутника Fengyun-1C 11.01.2007, в результате которого образовалось более 3000 каталогизированных объектов КМ;

2) столкновение американского действующего спутника связи Iridium 33 и российского неактивного КА Космос – 2251 10.02.2009 на высоте около 780 км, в результате которого образовалось более 2000 каталогизированных объектов КМ.

Количество объектов, образовавшихся в результате столкновения КА Космос 2251 и Iridium 33, значительно больше, чем количество объектов, которое образуется в результате одного взрыва составных частей КА или разгонных блоков (баков, аккумуляторов и т.п.).

Можно выявить всего два фундаментальных средства управления будущим состоянием техногенного засорения: предотвращение образования и активное удаление КМ. С принятием международных руководящих принципов предотвращения образования КМ, таких как: «Руководящие принципы Межагентского координационного комитета по космическому мусору по предупреждению образования космического мусора» и «Руководящие принципы Комитета ООН по космосу по предупреждению образования космического мусора», с реализацией мер по снижению образования КМ, были сокращены темпы роста нового КМ из многих ключевых источников. Национальным механизмом решения задачи ограничения техногенного засорения является введенный в действие с 1 января 2009 г. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52925-2008 «Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства». Требования этого стандарта гармонизированы с требованиями международных документов.

Однако, последние исследования отечественных и зарубежных специалистов (А.И.Назаренко, J.-C.Liou, H.Lewis, D.Bastida-Virgili) говорят о

недостаточности применения данных мер в долгосрочной перспективе, потому что текущее состояние техногенного засорения достигло уровня, когда взаимные столкновения могут инициировать процесс саморазмножения КМ, широко известный как "синдром Кесслера", даже с учетом реализации всех мер по ограничению техногенного засорения. Поэтому в мире приходят к выводу о необходимости «очистки» околоземного космического пространства (ОКП).

Теоретические исследования по методам активного удаления нефункционирующих объектов из ОКП в разных странах ведутся более десяти лет. На крупнейших симпозиумах по вопросам КМ главной задачей ближайшего будущего называют задачу активного удаления. Однако в настоящее время нет достаточного обоснования эффективности применения активного удаления на долговременное состояние техногенного засорения. Актуальным и новым направлением исследований является оценка влияния активного удаления космического мусора на стабилизацию и снижение техногенного засорения в долгосрочной перспективе.

В настоящее время для решения задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления КМ используется методика, основанная на применении «поштучного» описания космических объектов, имитационного моделирования и метода Монте-Карло. Основными недостатками данной методики является большое время вычислений одной реализации и малое количество реализаций при оценке, что приводит к большому разбросу получаемых результатов. В России отсутствуют разработанные методики и программные комплексы, которые позволяли бы применить данную методику и решать поставленную задачу.

В качестве альтернативы, предлагается методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления КМ, основанная на раздельном моделировании различных групп объектов и использовании статистической модели КМ Space Debris Prediction and Analysis (SDPA), разработанной А.И.Назаренко. Отличительной особенностью разработанной методики является существенно меньшие затраты времени вычислений.

SDPA – это статистическая модель для описания и прогнозирования техногенного космического мусора. В модели рассматриваются суммарные данные о космическом мусоре различных размеров (без «привязки» их к конкретным источникам засорения). Текущее состояние засорения ОКП характеризуется: а) зависимостью концентрации КМ от высоты и широты точки и б) статистическими распределениями величины и направления скорости объектов в инерциальной системе координат.

Целью диссертационной работы является обеспечение безопасности функционирования космических систем на низких околоземных орбитах в условиях техногенного засорения.

Объект исследования

Популяция космического мусора в области низких околоземных орбит.

Предмет исследования

Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора.

Методы исследования

Основными методами исследования, используемыми в работе, являются: системный анализ; методы механики космического полета; статистическое моделирование. При программной реализации математического обеспечения используются методы объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна результатов

В работе получены следующие результаты, обладающие новизной и научной значимостью:

1) методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора, основанная на раздельном моделировании и статистической модели КМ;

2) частные компоненты статистической модели космического мусора для оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления;

3) программно-математическое обеспечение для оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления космического мусора.

Практическая значимость результатов исследования

1) Разработанные методика и программно-математическое обеспечение обладают практической значимостью для принятия административных решений в области ограничения и снижения техногенного засорения.

2) Получены оценки влияния активного удаления космического мусора на долгосрочную эволюцию техногенного засорения области низких околоземных орбит при различных сценариях;

3) Выявлены области низких околоземных орбит, для которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления космического мусора для стабилизации и снижения техногенного засорения в долгосрочной перспективе.

Достоверность результатов подтверждается использованием апробированного математического аппарата, обоснованием полученных результатов сравнительным анализом.

Внедрение результатов диссертационной работы

Результаты работы использовались в СЧ НИР «Магистраль» (Устойчивость-КМ-КОСМОНИТ) и в учебном процессе кафедры «Системный анализ и управление». Получены акты о внедрении результатов в НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы» и в МАИ на кафедре 604 «Системный анализ и управление».

Апробация работы

Результаты работы докладывались и получили одобрение на отечественных и международных научно-технических конференциях: 6-я Европейская конференция по космическому мусору (г. Дармштадт, Германия, 2013), 65-й Международный астронавтический конгресс (г. Торонто, Канада, 2014), 19-я Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (г. Анапа, 2014), 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2014» (г. Москва, 2014).

Результаты по теме диссертации опубликованы в 3 статьях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в 1 статье входящей в базу данных Scopus, в 1 монографии, в сборниках тезисов и сборниках трудов 4 конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 61 формулу и 36 наименований литературных источников.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления КМ, основанная на раздельном моделировании и статистической модели КМ.

2. Частные компоненты статистической модели КМ:

- расчета статистических распределений КМ;
- оценки частоты столкновений;
- оценки последствий столкновений;

необходимые для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления.

3. Программно-математическое обеспечение для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления КМ.

4. Результаты сравнительного анализа и рекомендации по областям низких околоземных орбит для активного удаления КМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности и новизны задачи разработки методики оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления крупных объектов космического мусора для объектов размером более 10 см.

Первая глава содержит анализ техногенного засорения околоземного космического пространства, методов его ограничения и снижения, постановку задачи исследования. Целью данного анализа является выявление наиболее актуальных задач в области исследования методов снижения и ограничения техногенного засорения, а также формулировка задач, позволяющих достичь поставленной цели, а именно:

1) разработать методику оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора на основе отдельного моделирования и статистической модели КМ;

2) сформировать набор частных математических моделей космического мусора и модифицировать для использования в методике;

3) разработать программно-математическое обеспечение для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора для объектов размером более 10 см;

4) провести оценку долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см для различных сценариев, сравнительный анализ результатов для подтверждения работоспособности методики и программно-математического обеспечения, выявить области низких околоземных орбит, для которых активное удаление космического мусора наиболее актуально в будущем.

В данной главе обосновывается выбор области низких околоземных орбит, как области ОКП, для которой актуально проводить данное исследование. Рассматривается и обосновывается использование статистической модели КМ для решения задачи оценки долговременной эволюции, анализируются возможные методы активного удаления, как доказательство факта проработки данных методов и возможности их применения в будущем.

Вторая глава содержит описание разработанной методики и сформированного набора модифицированных для использования в методике частных моделей космического мусора.

Особенностью статистической модели КМ является то, что техногенное засорение полностью описывается статистическими распределениями. Для области низких околоземных орбит (с высотой до 2000 км) используется допущение, что статистические распределения трех угловых элементов орбит (средней аномалии в начальный момент времени, долготы восходящего узла и аргумента перигея) являются равномерными. В качестве исходных данных модели выступают распределения трех элементов орбиты: высоты перигея, наклона и эксцентриситета, а также распределение баллистических коэффициентов объектов. Однако, в качестве объектов для удаления выступает относительно малое, по сравнению с общей популяцией КМ, количество объектов, соответствующих определенным требованиям или критерию удаления. Поэтому целесообразным является выделение из общего множества объектов (X), рассматриваемых в исследовании, подмножества объектов (ADR), к которым может применяться операция активного удаления. Аналогичным образом из множества всех объектов можно выделить подмножество новых запускаемых объектов (NEW), к которым применяются меры по ограничению техногенного засорения. Таким образом, все множество объектов X будет состоять из трех подмножеств: D – космический мусор, ADR – объекты, к которым может быть применена операция активного удаления, NEW – новые запускаемые объекты, относительно которых рассматриваются меры по ограничению техногенного засорения, $X = D \cup ADR \cup NEW$. С использованием такого разделения всех объектов на подмножества, к каждому из них можно применить отдельно либо подход со статистическим описанием либо подход с "поштучным" описанием.

Множество X и подмножество D описываются с использованием статистической модели КМ и предусмотренных в ней распределений для решения задач оценки числа взаимных столкновений и последствий столкновений.

Подмножества ADR и NEW описываются дополнительно с использованием полной информации о каждом объекте, аналогично подходу с "поштучным" описанием объектов, для того чтобы учитывать активное удаление объектов КМ и меры по ограничению техногенного засорения в процессе моделирования.

Прогнозирование орбитальной эволюции объектов подмножества D осуществляется с использованием подхода, предложенного в статистической модели КМ.

Прогнозирование орбитальной эволюции объектов из подмножеств ADR и NEW осуществляется с использованием прогнозирования орбитальных элементов каждого объекта отдельно, т.е. каждый объект из данных подмножеств будет описываться отдельным набором параметров, чтобы его можно было исключить из статистических распределений, которыми описывается множество X .

Последовательность шагов методики.

I. Исходные данные.

– Исходными данными о популяции космических объектов выступают следующие параметры каждого объекта с высотой перигея менее 2000 км:

некоординатные параметры:

- 1) тип объекта: РБ, КА, крупный операционный мусор, КМ;
- 2) масса объекта;
- 3) диаметр объекта;
- 4) характерная площадь объекта;

параметры орбиты:

- 5) большая полуось;
- 6) эксцентриситет;
- 7) наклонение.

– Аналогичными параметрами задается прирост объектов вследствие новых запусков в будущие моменты времени.

– Задается сценарий прогноза, в котором описывается критерий активного удаления КМ, количество удаляемых объектов, учет мер по ограничению техногенного засорения.

Исходные данные также могут быть заданы в виде распределений для подмножества D и списка с параметрами каждого объекта из подмножеств ADR и NEW .

II. Оценка долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления.

– На основании исходных данных о популяции космических объектов с учетом критерия удаления все объекты разделяются на два подмножества D и ADR .

– Для объектов из подмножества D строятся соответствующие распределения трех элементов орбиты: высоты перигея, наклонения и эксцентриситета, а также распределение баллистических коэффициентов объектов.

– Каждый объект подмножества ADR описывается отдельно с использованием 7 параметров представленных выше. На основании данных 7 параметров всегда можно построить соответствующие распределения, аналогичные распределениям для подмножества D .

– Прогнозирование ведется с шагом один год по времени.

– При прогнозировании учитывается тот факт, что изменение наклонения для объектов в области низких околоземных орбит не испытывает вековых

возмущений и слабо изменяется, поэтому при решении данной задачи орбитальная эволюция рассчитывается для высоты перигея и эксцентриситета.

– Задаются объекты *NEW*, аналогично объектам подмножества *ADR*, при этом каждому объекту присваивается дополнительный параметр с годом запуска, для учета мер по ограничению техногенного засорения.

– С использованием распределений для объектов из подмножеств *D*, *ADR* и *NEW* путем их суммирования строятся распределения общего множества *X*.

– С использованием распределений множества *X* и статистической модели КМ рассчитываются оценки количества и последствий столкновений на заданном интервале времени, которые описываются аналогичными распределениями и добавляются в распределения подмножества *D*.

– Проводится прогноз орбитальной эволюции объектов из подмножеств *D*, *ADR* и *NEW* на заданный интервал времени. Для подмножества *D* используется статистическая модель КМ, в которой прогнозируется распределение высот перигея объектов. Для подмножеств *ADR* и *NEW* прогнозируются орбитальные параметры высоты перигея и эксцентриситета каждого объекта отдельно. По окончании шага получаются перестроенные распределения подмножеств *D*, *ADR* и *NEW* и параметры объектов подмножеств *ADR* и *NEW*.

– Если на данном шаге учитывается активное удаление КМ, согласно критерию удаления из подмножества *ADR* удаляется заданное количество объектов, после чего перестраиваются распределения объектов данного подмножества.

– Если на данном шаге учитываются меры по ограничению техногенного засорения для объектов из подмножества *NEW*, запущенных в заданном году ранее, согласно учитываемым мерам каждый объект из множества *NEW* либо удаляется из него, либо ему задаются требуемые согласно мерам ограничения орбитальные параметры. Объекты, срок активного функционирования которых закончился, переводятся в подмножество *D* или *ADR* в зависимости от их характеристик.

– Переход к следующему шагу по времени.

Для прогнозирования орбитальной эволюции подмножества объектов *D* используется эволюционное уравнение прогноза распределения объектов по высоте перигея. Плотность распределения объектов космического мусора по высоте перигея из некоторой группы с определенными значениями других параметров (эксцентриситет, баллистический коэффициент и др.) в момент времени t обозначается как $p(h,t)$. Для дискретного распределения $p(h,t)$ на

некотором заданном интервале высот с шагом Δh выведено уравнение его эволюции по времени

$$\frac{dp(h,t)}{dt} = \frac{\partial V(h,t)}{\partial h} \cdot p(h,t) + p(h,t)_{new}, \quad (1)$$

где $V(h,t)$ – скорость уменьшения высоты перигея объектов с высотой h , $p(h,t)_{new}$ – распределение новых объектов, образующихся в результате запусков и последствий столкновений. Принцип пересчета распределения представлен на рисунке 1.

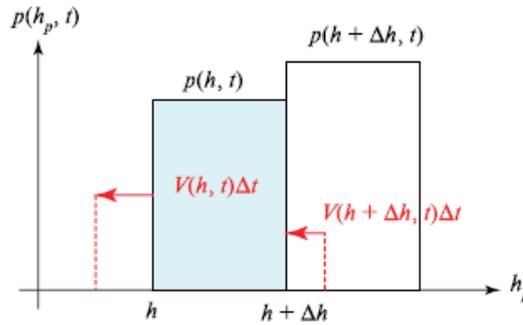


Рисунок 1 – Распределение космических объектов $p(h,t)$ по высоте перигея

Прогнозирование орбитальной эволюции каждого объекта подмножеств ADR и NEW происходит с использованием уравнений для возмущения высоты перигея (δh) и эксцентриситета (δe) за виток под действием атмосферы

$$\delta e = -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \cdot \exp(-z) \cdot \left\{ I_1(z) + 0.5e[I_0(z) + I_2(z)] + \frac{1}{8}e^2 \cdot [3I_1(z) + I_3(z)] + \dots \right\}, \quad (2)$$

$$\delta h = -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \cdot \frac{a}{1+e} \cdot \exp(-z) \cdot \{ I_0(z) - I_1(z) + e \cdot [I_1(z) - 0.5 \cdot I_0(z) - 0.5 \cdot I_2(z)] + \dots \}, \quad (3)$$

где a и p – полуось и фокальный параметр орбиты, ρ – плотность атмосферы в перигее, $z = a \cdot e / H$, $I_j(z)$ – функции Бесселя мнимого аргумента порядка j . Основным параметрами для расчета орбитальной эволюции является плотность атмосферы с учетом 11-летнего цикла солнечной активности. Для расчета плотности верхней атмосферы используется модель ГОСТ Р 25645.166-2004. Для описания циклов солнечной активности используется модель ГОСТ 25645.302-83.

Для определения количества взаимных столкновений рассчитывается среднее значение потока космического мусора Q [$1/m^2 \cdot год$] – это количество столкновений сферического КА на заданной орбите с площадью сечения $1 m^2$ с другими объектами. С его использованием можно рассчитать число взаимных столкновений на заданном интервале времени. Для этого с использованием распределения орбитальных параметров множества X рассчитываются следующие характеристики:

$\rho(h, \varphi)$ – концентрация космических объектов в зависимости от высоты и широты в инерциальном пространстве, характеризующая среднее число объектов в единице объема;

$V_r(h)$ – распределение радиальной скорости КО в инерциальном пространстве;

$V_t(h)$ – распределение тангенциальной скорости КО в инерциальном пространстве;

$A(h, \varphi)$ – распределение углов азимута пролета объектов от высоты и широты точки в инерциальном пространстве.

На основании данных распределений рассчитывается среднее значение потока космического мусора за виток для любой орбиты.

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^T \rho(t) \cdot \int_{A=0}^{2\pi} p(t, A) V_{rel}(t, A) \cdot dA \cdot dt, \quad (4)$$

где $p(t, A)$ – азимутальное распределение тангенциальной скорости, $V_{rel}(t, A)$ – относительная скорость объектов КО в заданной точке пространства в момент времени t , T – период обращения.

Для оценки последствий столкновений так же строится статистическое распределение относительной скорости столкновений pV_{rel} для КО на всевозможных орбитах.

Если среднее значение потока \bar{Q} определено, то достаточно точную оценку числа столкновений КО площадью S с другими объектами на временном интервале $t - t_0$ можно вычислить по формуле

$$N = S \cdot \bar{Q} \cdot (t - t_0). \quad (5)$$

Расчет последствий столкновения строится с использованием модели фрагментации для числа образующихся частиц с массой более m

$$N(> m) = A \cdot (m / M)^B \quad (6)$$

с коэффициентами $A=0,4$ и $B=-0,68$.

Все столкновения можно разделить на 2 группы: катастрофические и не катастрофические. Для определения типа столкновения используется выделившаяся при столкновении энергия. Формула для определения выделившейся при столкновении энергии является частным случаем более общей формулы, применимой для различных условий столкновений

$$u = U/M = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot V_{rel}^2 \quad (7)$$

где m_1 и m_2 массы сталкивающихся объектов, $M = m_1 + m_2$, $k_1 = m_1/M$, $k_2 = m_2/M$, V_{rel} – относительная скорость столкновения. Если $u > 40$ [Дж/г], то столкновение считается катастрофическим и фрагментируются оба объекта с заданными массами, тогда в модели фрагментации $M = m_1 + m_2$, в противном случае в формуле используется коэффициент $M = m_{\min}$.

При столкновении КО образующиеся объекты получают некоторое приращение скорости ΔV , в результате чего параметры их орбит изменяются. Доля выделившейся при столкновении энергии, которая тратится на приращение скорости фрагментов, определяется по формуле

$$\Delta V = k_v \cdot u/V, \quad (8)$$

где $k_v = 0,1$, V – скорость объектов на высоте столкновения.

Анализ известных случаев столкновений показал, что для моделирования разлета фрагментов пригодно равномерное распределение по сфере приращения скорости для образующихся фрагментов, вследствие чего можно рассчитать изменение высоты перигея в зависимости от приращения тангенциальной скорости ΔV и большой полуоси орбиты a с использованием формулы

$$\Delta h = 4 \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{V}. \quad (9)$$

На рисунке 2 представлено сравнение последствий столкновения спутников Iridium 33 и Космос 2251 по данным наблюдения и моделирования. На рисунке слева у части объектов уменьшилась высота апогея вследствие действия атмосферы, т.к. данный график построен по измерениям спустя некоторое время.

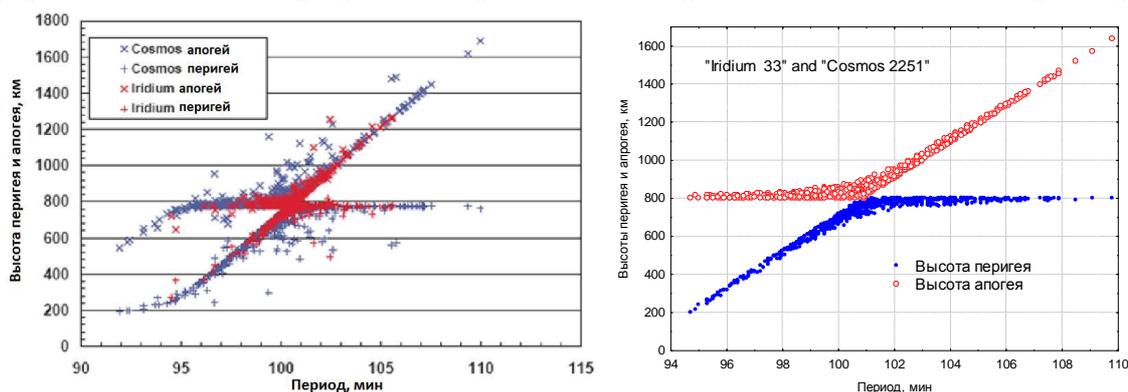


Рисунок 2 – Сравнение расчетных диаграмм Габбарда столкновения спутников Iridium и Космос с модельными расчетами

Последствия столкновений рассчитываются на множестве возможных столкновений отличающихся высотой столкновения, относительной скоростью и массами сталкивающихся объектов. Выходными данными являются математическое ожидание и дисперсия распределения $N(h)_{new}$ числа образующихся фрагментов размером более 10 см по высоте перигея в результате столкновений.

Третья глава содержит основные принципы построения программно-математического обеспечения для решения задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления, описание основных модулей и структурной схемы программного комплекса. На рисунке 3 представлена структурная схема разработанного комплекса.



Рисунок 3 – Структурная схема программного комплекса

Программный комплекс состоит из трех основных блоков: интерфейса, блока преобразования данных и блока математических моделей. В блоке интерфейса реализован ввод исходных данных и сценария для расчета, а также вывод результатов в виде файла и графиков. Блок преобразования данных используется для формирования из исходных данных массива данных, требуемых в математической модели, и для преобразования полученных результатов к заданному выходным данным. В блоке математической модели реализована разработанная методика и частные модели КМ.

Четвертая глава содержит результаты: использования разработанного программного комплекса и методики оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления КМ для объектов размером более 10 см с использованием сценариев согласно исходным данным, разработанным Межагентским координационным комитетом по космическому мусору; анализ полученных результатов и их сравнение с аналогичными; рекомендации по областям, в которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления космического мусора.

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 должны быть уведены из области НОО либо сразу по окончании функционирования, либо должны быть переведены на орбиты со сроком орбитального существования не более 25 лет, на английском - Post Mission Disposal (PMD)). Для оценки влияния активного удаления КМ разработаны 9 сценариев, в которых помимо мер по ограничению учитывают одно из 3 значений количества уводимых в год объектов: 2, 5, 8 объектов с наибольшим значением произведения массы объекта на вероятность столкновения в год (на английском - Active Debris Removal (ADR)). В расчетах использовался критерий произведения $M_i S_i Q_i$, где M_i – масса объекта, S_i – площадь объекта, Q_i – поток космического мусора для орбиты i -го КА, который является аналогом произведения массы на вероятность столкновения. Активное удаление начинается с 2025 года.

На рисунках далее представлена зависимость среднего количества объектов в области НОО на интервале моделирования. На рисунке 4 слева представлены результаты расчета, полученные по всем сценариям исследования. На рисунке 4 справа представлены результаты, полученные зарубежными специалистами по аналогичным исходным данным и сценариям. На основании данного рисунка можно сделать вывод, что полученные результаты хорошо соответствуют аналогичным. Однако, все результаты так или иначе имеют некоторые различия.

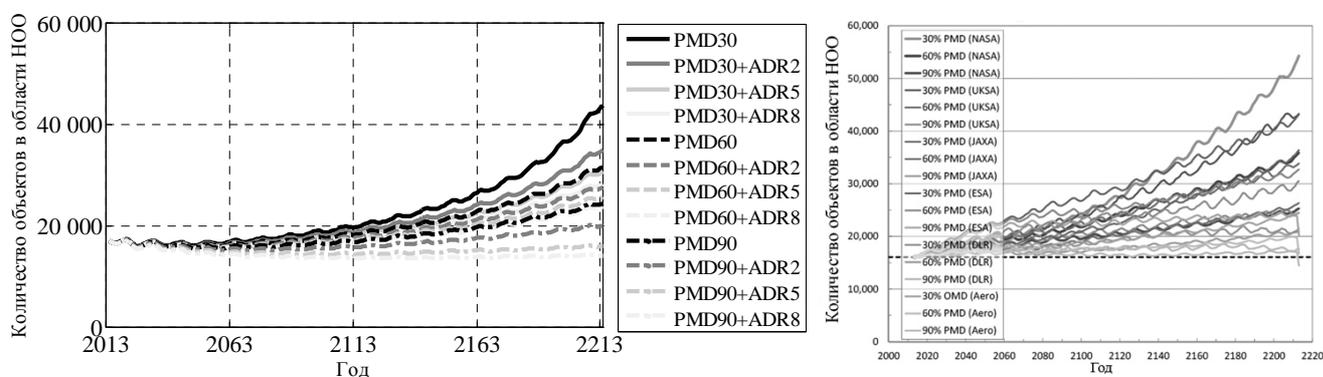


Рисунок 4 – Сравнение результатов прогноза по исследуемым сценариям

В таблице 1 представлены обобщенные результаты моделирования по рассматриваемым сценариям, которые показывают влияние мер по ограничению техногенного засорения и активного удаления на конец интервала моделирования. Как видно из данных результатов, для стабилизации и снижения техногенного засорения области низких околоземных орбит необходимо, помимо соблюдения мер по ограничению техногенного засорения, удалять 5 объектов в год.

На рисунке 5 представлены оценки количества объектов, полученные с использованием разработанного программного комплекса и оценки NASA для

сценария наилучшим выполнением мер по ограничению техногенного засорения, без активного удаления.

Таблица 1 – Обобщенные данные результатов моделирования на конец интервала прогноза

Сценарий	PMD 30%	PMD 60%	PMD 90%	PMD 90% + ADR 2	PMD 90% + ADR 5	PMD 90% + ADR 8
Изменение количества объектов	+157 %	+86 %	+43%	+18%	-6.5%	-18%
Оценка количества столкновений	149	104	77	58	49	34
Изменение максимальной концентрации	+200%	+113%	+62%	+29%	-5%	-19%

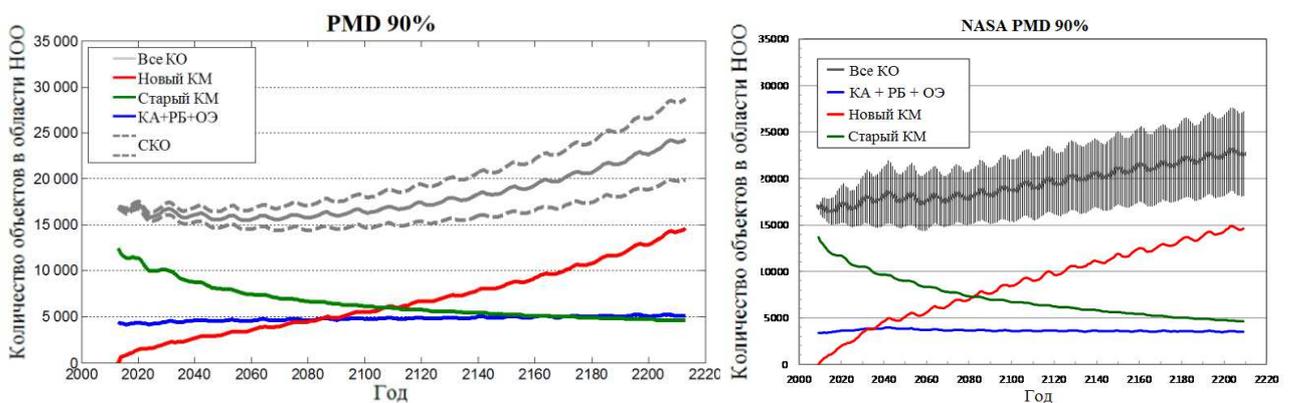


Рисунок 5 – Сравнение результатов прогноза с результатами NASA

Как видно из сравнения результатов с данными NASA, наблюдается хорошее соответствие. Результаты на рисунке 5 показывают, что в случае соблюдения мер по ограничению техногенного засорения, оно будет продолжать увеличиваться.

На рисунке 6 представлены результаты оценки, полученные с использованием разработанной методики и полученные специалистами Космического агентства соединенного королевства (UKSA), для сценариев с наилучшим выполнением мер по ограничению техногенного засорения и удалением 2, 5, 8 объектов.

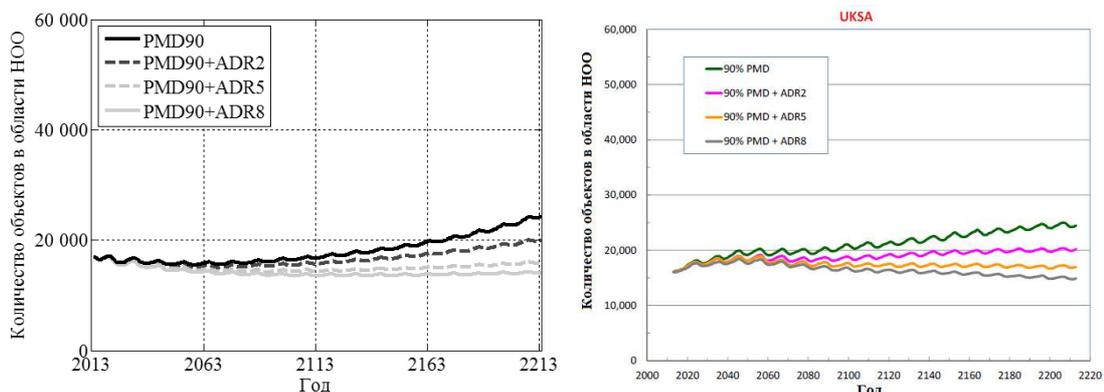


Рисунок 6 – Сравнение результатов прогноза с результатами UKSA

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

На рисунке 7 представлены графики областей по высоте и наклонению в которых наиболее актуально активное удаление, полученные по результатам использования разработанной методики и по исследованиям специалистов NASA. Как видно из рисунка 7, полученные результаты хорошо согласуются.

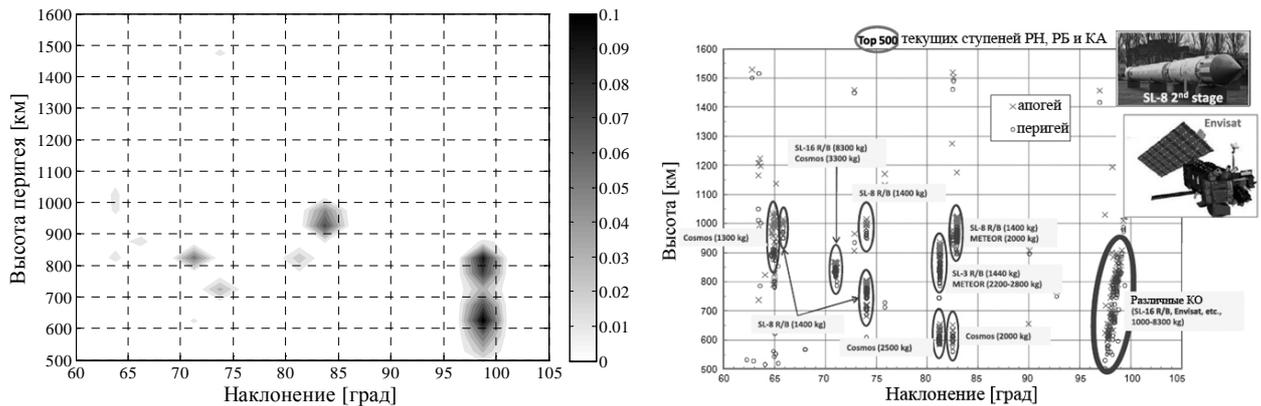


Рисунок 7 – Области для активного удаления космического мусора

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) $h_n=800-850$ км, $i=71,25^0$; 2) $h_n=650-800$ км, $i=98,75^0$; 3) $h_n=900-950$ км, $i=83.75^0$.

Основные результаты работы

В представленной работе сформулирована и решена актуальная научно-техническая задача, связанная с разработкой методики оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора, разработкой программно-математического обеспечения с реализацией данной методики, что позволило оценить влияние активного удаления на техногенное засорение области низких околоземных орбит объектами размером более 10 см и выявить области в которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления.

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

- 1) методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации операций активного удаления космического мусора, основанная на раздельном моделировании и статистической модели КМ;

2) частные математические модели космического мусора для решения задачи оценки долгосрочной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления;

3) программно-математическое обеспечение для оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления КМ для объектов размером более 10 см.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что:

1) разработанная методика и программно-математическое обеспечение могут быть использованы для принятия административных решений в области ограничения и снижения техногенного засорения;

2) получены оценки влияния активного удаления космического мусора на долгосрочную эволюцию техногенного засорения области низких околоземных орбит при различных сценариях;

3) выявлены области низких околоземных орбит, для которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления космического мусора для стабилизации и снижения техногенного засорения в долгосрочной перспективе.

Для валидации полученных результатов проведены расчеты и сравнение по исходным данным Межагентского координационного комитета по космическому мусору с аналогичными результатами зарубежных специалистов. Данное сравнение показало, что разработанная методика и программно-математическое обеспечение не уступает зарубежным аналогам.

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: 1) $h_n=800-850$ км, $i=71,25^0$; 2) $h_n=650-800$ км, $i=98,75^0$; 3) $h_n=900-950$ км, $i=83.75^0$.

В заключение необходимо отметить, что разработанная автором методика и программно-математическое обеспечение позволяет решать задачу оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом активного удаления с временными затратами на порядок меньшими, чем аналогичные методики и программы, при этом не уступая им по характеристикам.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах Перечня ВАК РФ

1. Усовик И.В., Малышев В.В., Дарнопых В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. – 2015. – Том 22, №3. – С. 54-62.

2. Усовик И.В. Анализ характеристик потока космического мусора на низких околоземных орбитах с использованием уточненной модели // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – Выпуск № 3(76). – С. 97-102.

3. Усовик И.В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2014. – Выпуск № 65. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35841>.

Статьи в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus

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

Другие публикации

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

6. Усовик И.В. Методика прогнозирования техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Сборник тезисов «XIII Международная конференция Авиация и космонавтика». – М.: МАИ, 2014. – С. 194.

7. Усовик И.В. Системный анализ проблемы активного удаления космического мусора // Сборник тезисов «XX Международная конференция Системный анализ, управление и навигация». – Евпатория, 2015. – С.43.

8. Usovik I.V., Loginov S.S., Mikhailov M.A., Yakovlev M.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 // 65-th International Astronautical Congress. – Toronto, Canada, 2014.

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

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