

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
«МАИ»

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)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:      Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук,  
профессор В.В. Малышев

Москва – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. Анализ техногенного засорения околоземного космического пространства и методов его снижения, постановка задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора</b> .....	13
1.1 Анализ техногенного засорения околоземного космического пространства, создаваемых космическим мусором проблем и методов их решения.....	13
1.2 Постановка задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора на основе статистической модели .....	38
1.3 Выводы по главе 1.....	42
<b>Глава 2. Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора</b> .....	43
2.1 Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления космического мусора .....	43
2.2 Модель эволюции космического мусора на низких околоземных орбитах ..	48
2.2.1 Эволюционное уравнение прогноза распределения космического мусора по высоте перигея .....	48
2.2.2 Определение скорости снижения высоты перигея.....	50
2.2.3 Модель верхней атмосферы и солнечной активности .....	53
2.3 Методика расчета взаимных столкновений .....	56
2.3.1 Методика расчета концентрации космических объектов.....	57
2.3.2 Методика расчета распределений скорости космических объектов в инерциальном пространстве .....	58
2.3.3 Методика расчета частоты столкновений и распределений относительной скорости столкновений.....	62
2.4 Методика расчета последствий столкновений.....	67
2.4.1 Модель последствий взаимных столкновений .....	67
2.4.2 Методика расчета распределений объектов, образующихся в результате столкновений .....	69

2.5 Выводы по главе 2.....	70
<b>Глава 3. Программный комплекс для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления .....</b>	<b>71</b>
3.1 Структура программного комплекса .....	72
3.2 Описание программных модулей.....	73
3.3 Выводы по главе 3.....	77
<b>Глава 4. Оценка эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора.....</b>	<b>78</b>
4.1 Сценарий и исходные данные.....	78
4.1.1 Сценарий моделирования .....	78
4.1.2 Исходные данные.....	80
4.2 Результаты оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора.....	87
4.3 Рекомендации по областям для активного удаления космического мусора .	96
4.4 Сравнительный анализ полученных результатов.....	100
4.5 Выводы по главе 4.....	103
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>104</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>106</b>
<b>Список работ, опубликованных автором по теме диссертации .....</b>	<b>107</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>109</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### 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) [1].

С момента запуска первого советского искусственного спутника Земли 4 октября 1957 г. по настоящее время средствами контроля космического пространства России и США было зарегистрировано и каталогизировано более 40000 космических объектов искусственного происхождения. Это - объекты размером более 10 см. Более 23000 из них снизились под действием атмосферы настолько, что достигли плотных слоев атмосферы, разрушились и сгорели или упали на Землю. Остальные, число которых более 17 000, продолжают оставаться в космосе. Характерной особенностью деятельности по освоению космического пространства является неуклонное его засорение объектами искусственного происхождения.

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, ступеней или разгонных блоков (баков, аккумуляторов).

Можно выявить всего два фундаментальных средства управления будущим состоянием техногенного засорения: предотвращение образования и активное удаление КМ [2]. С принятием международных руководящих принципов предотвращения образования КМ, таких как: «Руководящие принципы Межагентского координационного комитета по космическому мусору по предупреждению образования космического мусора» [3] и «Руководящие принципы Комитета ООН по космосу по предупреждению образования космического мусора» [4], 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» [5]. Требования этого стандарта гармонизированы с требованиями международных документов.

В стандарте задано несколько групп общих требований к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства:

- требования по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства при выполнении штатных операций;
- требования по предотвращению разрушений космических средств (предотвращение непреднамеренных разрушений орбитальных средств и средств выведения в процессе функционирования, предотвращение преднамеренных разрушений космических средств, предотвращение разрушений космических средств после окончания их активного функционирования);

- требования по предотвращению столкновений космических средств с космическими объектами;

- требования к уводу космических средств после завершения их функционирования в зоны захоронения или на орбиты с ограниченным сроком баллистического существования.

Однако, последние исследования отечественных и зарубежных специалистов (D.J. Kessler, А.И.Назаренко, J.-C.Liou, H.Lewis и др.) [6 - 10] 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 долгосрочное состояние техногенного засорения. Актуальным и новым направлением исследований является оценка влияния активного удаления космического мусора для стабилизации и снижения 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 (КО), имитационного моделирования и метода Монте-Карло[11, 12]. Основными недостатками данной методики является большое время вычислений одной реализации, малое количество реализаций при оценке, что приводит к большому разбросу получаемых результатов.

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 [13]. Отличительной особенностью разработанной методики является существенно меньшие затраты времени вычислений.

**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 операций 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**

В работе получены следующие результаты, обладающие новизной и научной значимостью (в скобках указаны соответствующие пункты паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (Авиационная и ракетно-космическая техника)»):

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 (пп. 2,3,11);

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 (пп. 3);

3) программно-математическое обеспечение для оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит для объектами размером более 10 см при реализации активного удаления космического мусора (пп. 5).

### **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) (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 4 статьях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, в одной монографии, в сборниках тезисов и сборниках трудов 6 конференций.

### **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;
- 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.

**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 модернизированных для использования в методике математических моделей.

Статистическая модель КМ в области низких околоземных орбит (с высотой до 2000 км) использует 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, характеризующих ее высоту, эллиптичность и наклонение, а также распределение баллистических коэффициентов объектов.

При прогнозировании техногенного засорения низких околоземных орбит принимается, что на эволюцию пространственно-временного распределения КМ основное влияние оказывают два фактора: прирост количества новых объектов в результате запусков, технологических операций, взрывов, взаимных столкновений и т.п., с одной стороны, и торможение в атмосфере, в результате влияния которого происходит уменьшение высоты перигея КО и их сгорание в атмосфере или падение на Землю. В данной работе к упомянутым выше факторам добавляется активное удаление КМ.

Суть методики заключается в разделении всего множества объектов на 3 подмножества таким образом, чтобы в процессе моделирования по времени использовать статистическую модель КМ и элементы "поштучного" описания объектов для учета активного удаления.

**Третья глава** содержит основные принципы построения программного обеспечения для решения задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации операций активного удаления КМ, описание основных модулей и структурной схемы программного комплекса. Программный комплекс состоит из 3 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 заданным выходным данным. В блоке математической модели реализована методика и модифицированные частные модели КМ.

**Четвертая глава** содержит результаты использования разработанного программного комплекса и методики для оценки долговременной эволюции техногенного засорения области НОО при реализации активного удаления для объектов размером более 10 см с использованием сценариев согласно исходным

данным, разработанным Межагентским координационным комитетом по космическому мусору. Анализ результатов и их сравнение с аналогами. Рекомендации по областям, в которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления КМ.

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). Для оценки эффективности 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.

## **Глава 1.**

# **Анализ техногенного засорения околоземного космического пространства и методов его снижения, постановка задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора**

## **1.1 Анализ техногенного засорения околоземного космического пространства, создаваемых космическим мусором проблем и методов их решения**

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

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

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

В настоящее время области ОКП определены следующим образом [15, 16]:

- область низких околоземных орбит: область ОКП, ограниченная высотой 2000 км (например, круговая орбита с периодом обращения 127 минут);
- область средневысоких околоземных орбит (СВО): область ОКП ограниченная высотами от 2000 км до 35586 км
- область геостационарной (геосинхронной) орбиты (ГСО) представляет собой торообразную фигуру, ограниченную по высоте  $35786 \pm 200$  км и наклонению  $0 \pm 15$  град.

В 1999 году Научно-техническим подкомитетом Комитета ООН по космосу был опубликован «Технический доклад по космическому мусору» [15], после чего Межагентский координационный комитет по космическому мусору включил в свою повестку вопрос о разработке международных руководящих принципов по предупреждению образования космического мусора. В 2002 году был принят документ «Руководящие принципы МККМ по предупреждению образования космического мусора» [3], который регулярно редактируется и обновляется на основе последних исследований. В этом документе были определены две защищаемых области в ОКП: НОО и ГСО. На рисунке 1.1 представлены отличительные признаки этих двух областей.

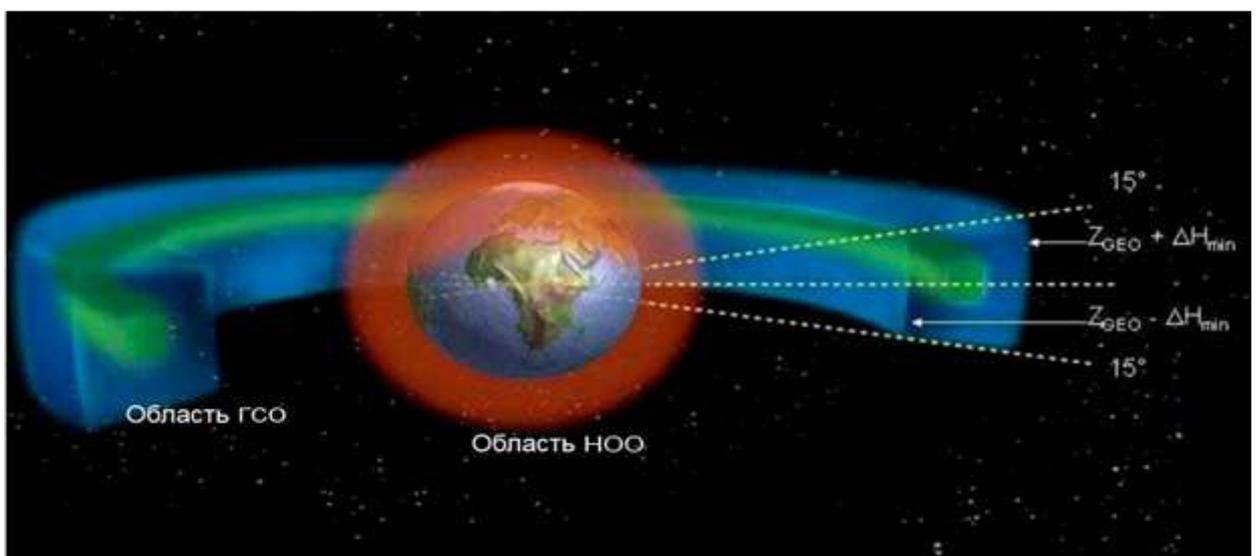


Рисунок 1.1.1 - Защищаемые области НОО и ГСО, как определено МККМ и принято НТПК ООН

Относительно этих защищаемых областей «Руководящие принципы МККМ...» гласят, что «любая деятельность человека в космосе должна проводиться с учетом уникальности защищаемых областей НОО и ГСО таким образом, чтобы гарантировать их безопасное и непрерывное использование в будущем. Эти области должны быть защищены в отношении образования космического мусора» [15].

В дополнение к «уникальному» статусу, эти две области оказались также наиболее востребованными для формирования целевых орбит большинства КА, выведенных в космос. Следовательно, сохранение возможности дальнейшего использования этих двух областей ОКП необходимо всем будущим поколениям. Одним из вопросов, рассматриваемых «Руководящими принципами МККМ...», является удаление КА по завершении их активного функционирования из зоны рабочих орбит. Чтобы снизить образование нового КМ в защищаемых областях вследствие их случайных столкновений, рекомендовано не допускать длительного пребывания нефункционирующих КА и ступеней ракет-носителей (РН) в областях НОО и ГСО. Рекомендация для области НОО относится не только к объектам, которые находятся там постоянно, но и к объектам, которые регулярно пересекают этот район, то есть находятся на эллиптических орбитах. «Руководящие принципы МККМ ...» требуют, чтобы космические системы (КС), находящиеся в области НОО по завершении их активного функционирования, были переведены на более низкие орбиты со сроком орбитального существования не более 25 лет, а КС, находящиеся в области ГСО, должны уводиться по завершении их активного функционирования на орбиту выше области ГСО. Области пространства между НОО и ГСО, т. е. область СВО, и выше области ГСО сознательно не определялись как защищаемые области. Однако «Руководящие принципы МККМ...» подтвердили их существование и предложили следующую рекомендацию: «По завершении целевого функционирования в заданной области орбит (кроме НОО и ГСО) КС должны выполнить маневр «увода» для уменьшения времени орбитального существования, по аналогии с ограничениями для НОО, или должны переводиться на другие орбиты, если они представляют

опасность с точки зрения взаимных столкновений в активно используемых областях орбит» [15].

В 2007 г. были приняты «Руководящие принципы Комитета ООН по космосу по предупреждению образования космического мусора» [4]. Данный документ согласован с «Руководящие принципы МККМ...», однако содержит больше общих требований, рекомендует государствам-членам ООН и международным организациям добровольно применять, через свои национальные и иные механизмы, меры по ограничению КМ. Рекомендуются их использовать при проектировании и эксплуатации вновь разрабатываемых КС. Данные принципы не являются Юридически обязательными согласно международному праву.

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

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

Классификация КМ согласно «Руководящим принципам МККМ...» [3], а также меры предотвращения образования различных групп КМ представлены в таблице 1.1.1. Более подробная классификация техногенных КО в ОКП представлена в блок-схеме на рисунке 1.1.2. [14], а также в таблице 1.1.2.

Таблица 1.1.1 - Классификация объектов КМ на группы согласно руководящим принципам МККМ

Категория	Причины образования	Рекомендации
Объекты, связанные с выполнением миссий	Объекты образованные преднамеренно	Разработка РКТ с использованием мер смягчения техногенного засорения
	Объекты образованные непреднамеренно	Разработка РКТ с большей надежностью
Фрагменты	Умышленное разрушение	Воздержание от преднамеренных разрушений
	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 использующуюся орбиту захоронения

Таблица 1.1.2 - Классификация КМ по размерам и опасности столкновения с КА

Категория КО	Размеры [см]	Оценка количества	Потенциальный риск столкновения с КА
Наблюдаемые	> 5-30	~ 21000	Полная потеря работоспособности
Потенциально наблюдаемые	> 1	~ 10 <sup>6</sup>	Полная или частичная потеря работоспособности
Ненаблюдаемые	< 1	~ 10 <sup>9</sup>	Ухудшение свойств отдельных систем



Рисунок 1.1.2 – Классификация КМ по типу

Характерной особенностью всей деятельности по освоению и использованию ОКП является его засорение объектами искусственного происхождения. Число запусков КА составляет в среднем около 100 штук в год, однако в последнее время происходит увеличение количества запусков большого количества малых КА в область НОО, за один запуск выводится более 30 малых КА. Вес ежегодно выводимых на орбиты объектов составляет примерно 160 тонн. В результате запусков новых КО, выполнения разного рода технологических операций на функционирующих КА, вследствие взрывов и аварий ежегодно образуется 600 - 700 объектов размером более 10 см [13]. На рисунках 1.1.3 и 1.1.4 представлены зависимости количества объектов и количество запусков РН по данным американской сети контроля космического пространства [16]. Как видно из графика на рисунке 1.1.3 количество КМ увеличивается, особенно следует отметить резкое изменение количества объектов в 2007 и 2009 годах, что связано с разрушением спутника Fengyun-1С и столкновением КА Iridium-33 и Космос 2251. Если посмотреть на соотношение объектов разного типа, то практически с самого начала космической деятельности, большая часть КО - это КМ. До 1990 г. в среднем проходило около 110 запусков космических РН в год, после 1990 г. в среднем происходило около 80 запусков космических РН в год. В настоящее время наблюдается тенденция увеличения количества запусков.

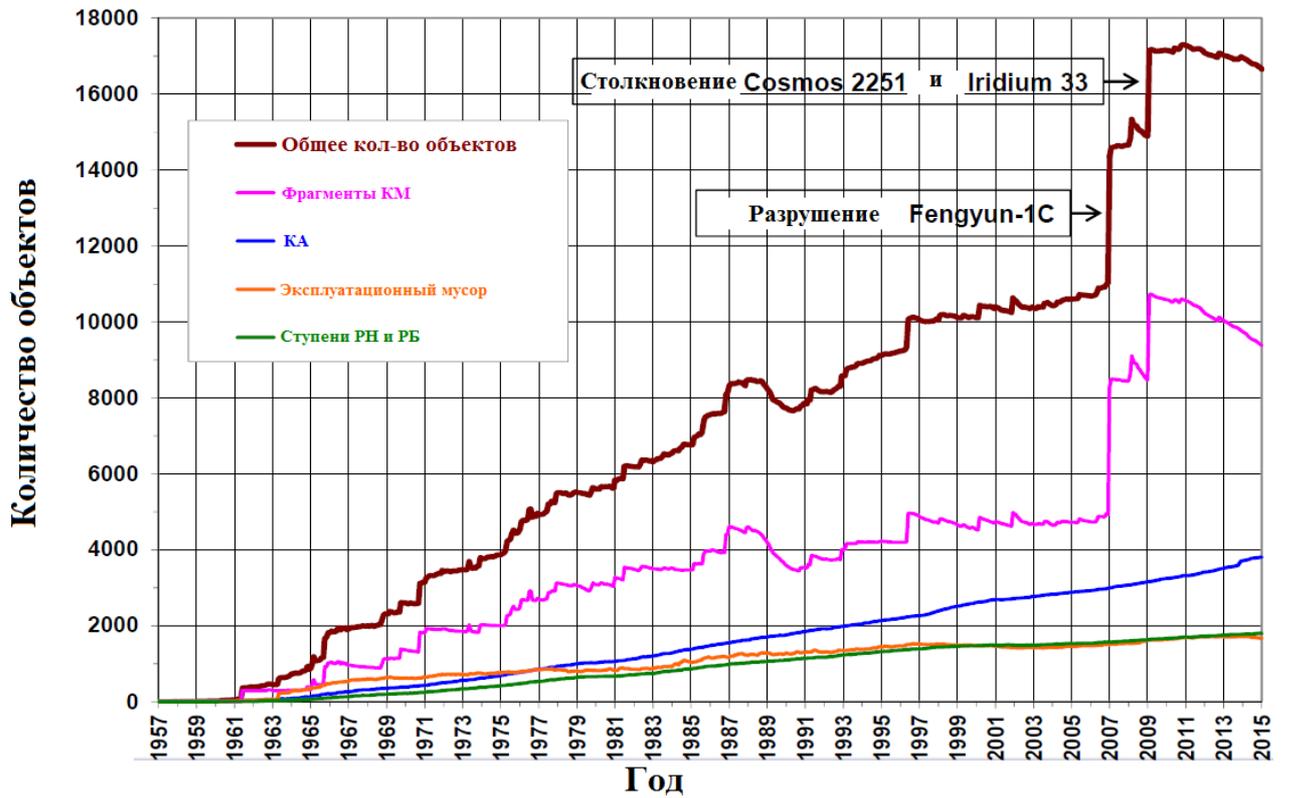


Рисунок 1.1.3 - Количество объектов разного типа в каталоге Американской сети контроля космического пространства

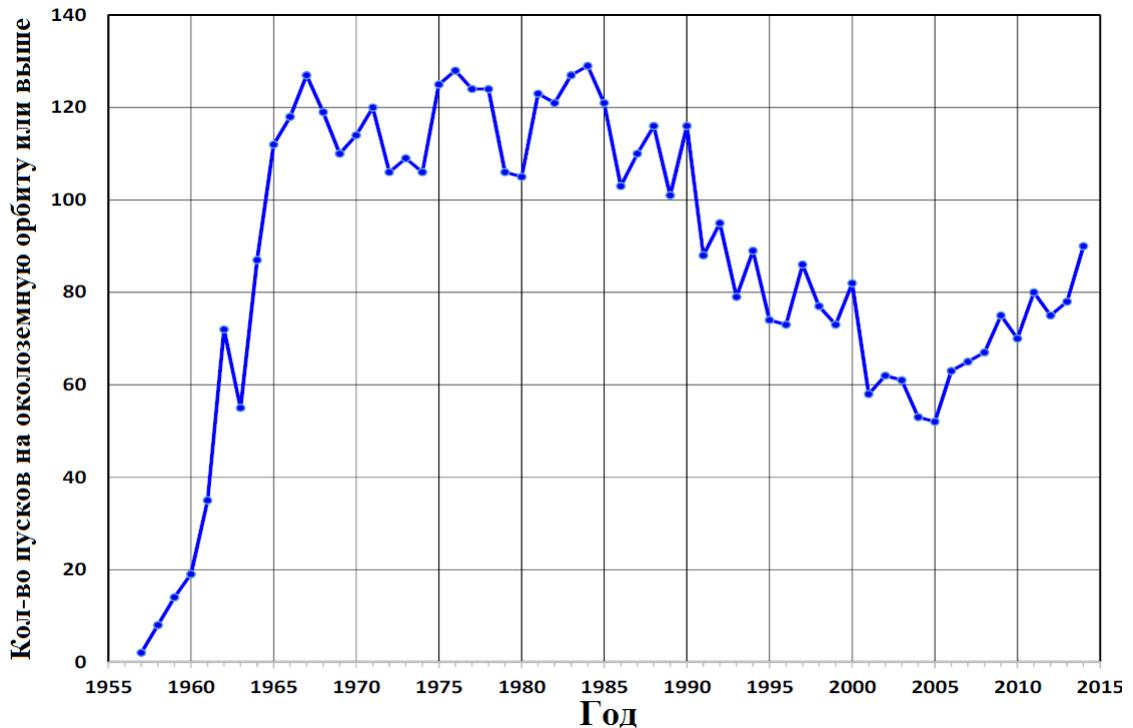


Рисунок 1.1.4 - Количество запусков космических РН по годам

Общая масса объектов в ОКП оценивается ~ в 7000 тонн. В области НОО располагается 77% от общего числа каталогизированных объектов, в области ГСО

сосредоточено 6% каталогизированных объектов, ~10% – в области высокоэллиптических орбит (ВЭО) и 7% – на других орбитах, в том числе, в области навигационных спутниковых систем. По своему составу каталогизированные объекты включают 20% КА, из которых активно функционируют только 6%; 11% составляют ступени РН и РБ; 5% операционные элементы, образовавшиеся в процессе выведения КА на рабочие орбиты. Основная часть каталогизированных космических объектов (64%) является продуктами разрушения КА, РН, РБ [1].

На рисунке 1.1.5 представлено расположение всех каталогизированных объектов в один момент времени в инерциальной системе координат. На рисунке 1.1.6 представлена зависимость концентрации каталогизированных объектов от высоты. Как видно из данного графика имеется 3 локальных максимума в области НОО, в области ГСО и в области полета навигационных спутниковых систем на СВО.

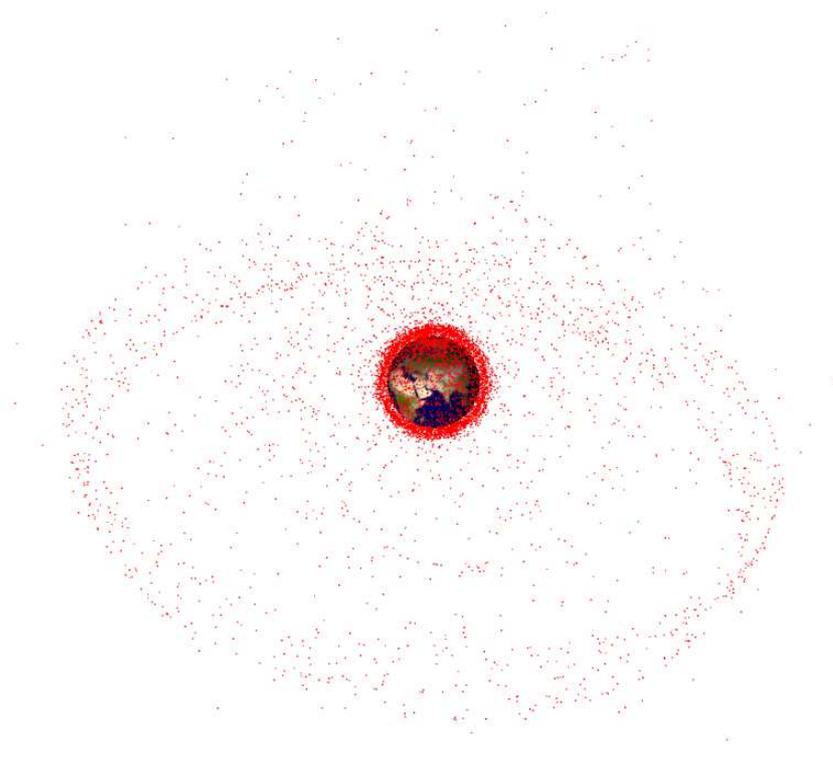


Рисунок 1.1.5 – Положение каталогизированных объектов в ОКП

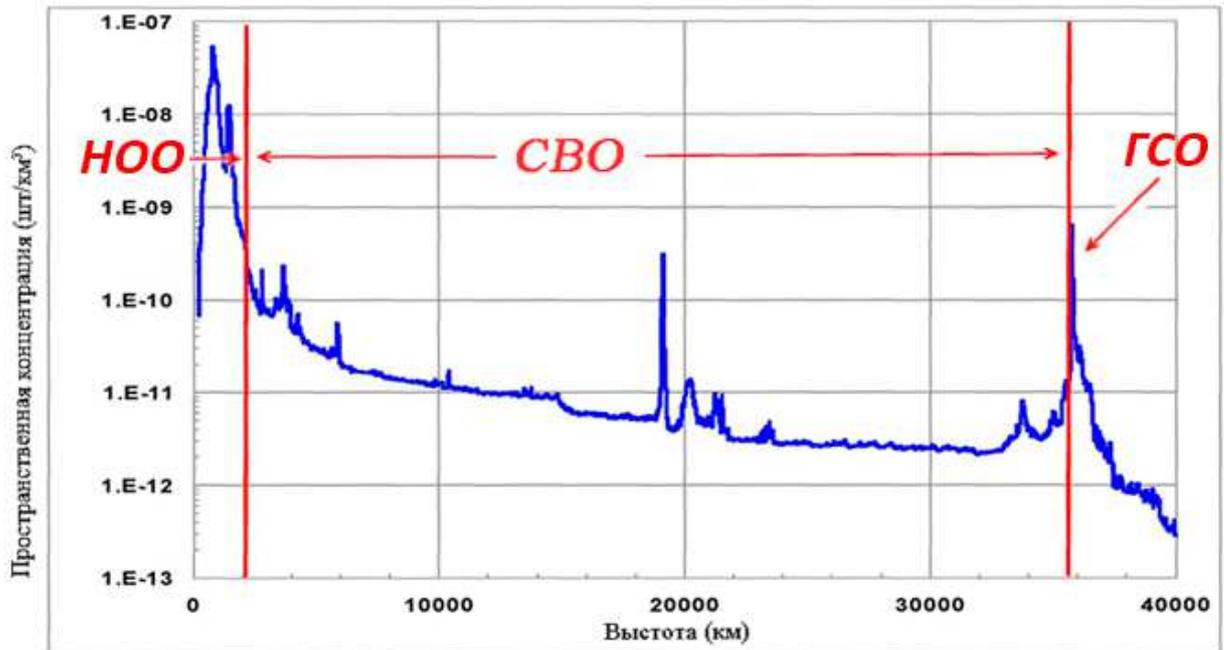


Рисунок 1.1.6 – Распределение концентрации каталогизированных объектов в различных областях ОКП

Основными источниками образования КМ в настоящее время являются случаи фрагментации на орбите вследствие случайных или преднамеренных взрывов, случайных или преднамеренных столкновений. Произошло более 250 событий разрушения КО на орбите, случайным образом или инициированных преднамеренно. В настоящее время событием, в результате которого образовалось наибольшее количество наблюдаемых фрагментов КМ, является преднамеренное разрушение Китайского спутника Fengyun-1C в 2007 г. Вторым по количеству образовавшихся фрагментов является столкновение КА Космос 2251 и Iridium 33. До разрушения спутника Fengyun-1C среди событий, порождающих долгоживущий мусор, доминировали непреднамеренные взрывы. Из-за энергии, выделяющейся при взрыве, эти события могут порождать сотни поддающихся отслеживанию объектов и десятки тысяч мелких фрагментов. Международные космические агентства стремятся сократить или исключить именно такие события. Случаем непреднамеренного взрыва, создавшего наибольшее количество объектов, до сих пор находящихся на орбите, был взрыв советского космического аппарата “Космос - 1275”. Взрыв батареи спутника привёл к возникновению 259 объектов, которые отслеживаются до сих пор, т.е. более чем

через 25 лет. Близкое второе место занимает американская ракетная ступень, которая выводила спутник Nimbus 4. В результате разрушения ступени образовалось более 370 наблюдаемых объектов, причём 240 элементов мусора находятся на орбите на протяжении более чем 35 лет [17]. Подробная история катастрофических случаев фрагментации КО до 2007 года представлена в отчете NASA [18]. На рисунках 1.1.7 и 1.1.8 представлено количество катастрофических событий в разные годы с 1961 г. и распределение их по причине происхождения.

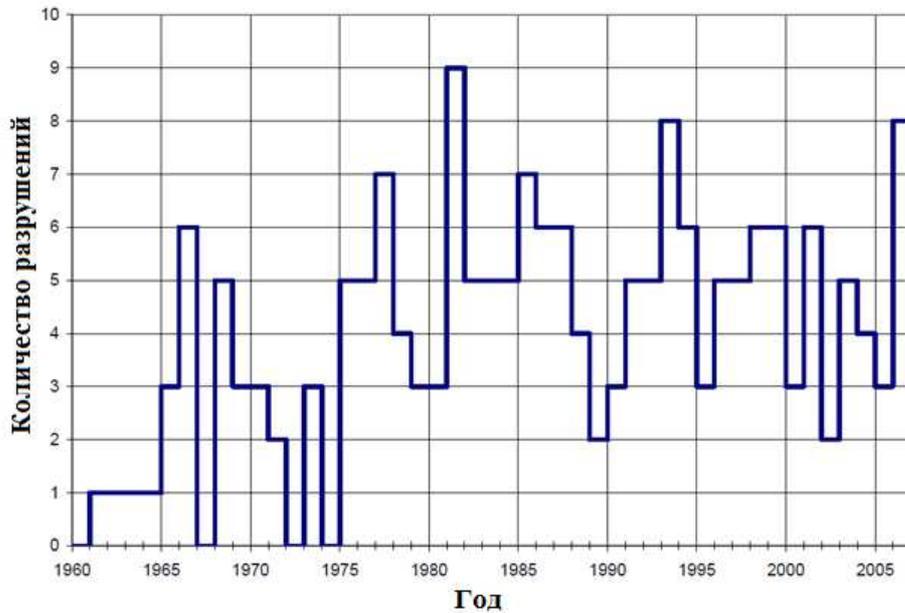


Рисунок 1.1.7 - Количество катастрофических случаев фрагментации по годам.

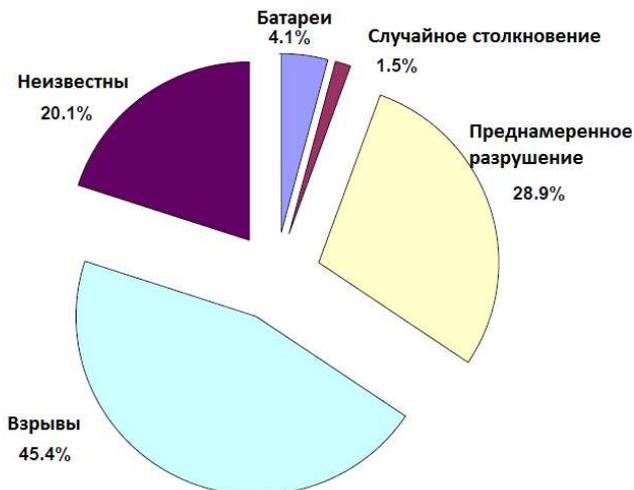


Рисунок 1.1.8 - Причины разрушения КО

За последнее десятилетие произошел значительный скачок засоренности, связанный с двумя катастрофическими событиями описанными выше, а именно:

1) преднамеренное разрушение китайского спутника Fengyun-1C 11.01.2007, в результате которого каталогизировано более 3000 фрагментов 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 каталогизировано более 2000 фрагментов КМ.

В результате этих двух событий техногенная засоренность ОКП в области НОО увеличилась на 40%.

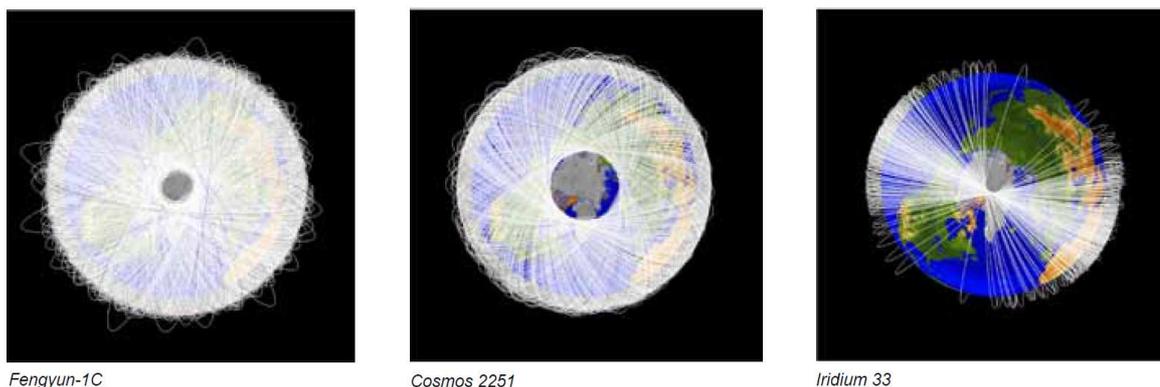


Рисунок 1.1.9 – Орбиты фрагментов Fengyun-1C, Космос -2251, Iridium 33 через 6 месяцев после разрушения

Как видно из этих фактов, с начала космической деятельности количество объектов образовавшихся в результате одного столкновения КА Космос 2251 и Iridium 33 значительно больше, чем количество объектов, образующееся в результате одного взрыва составных частей КА (баков, аккумуляторов). Количество подобных столкновений в будущем будет увеличиться и существенно влиять на техногенное засорение ОКП. Информация о некоторых известных до настоящего времени столкновениях представлена в таблице 1.1.3 [19].

Таблица 1.1.3 - Столкновения в ОКП

1991	Столкновение неактивного КА «Космос-1934» с каталогизированным КА «Космос-296» («мусором»)
1996	Столкновение активного французского КА Cerise с каталогизированным «мусором» – ступенью ракеты Ariane
1997	Неактивный КА NOAA-7 столкнулся с крупным некаталогизированным объектом, в результате чего орбита КА изменилась и образовался новый мусор
2002	Неактивный КА «Космос-539» столкнулся с крупным некаталогизированным объектом, в результате чего орбита NOAA-7 изменилась и образовался новый мусор
2007	Ракета США столкнулась с каталогизированным мусором от китайской ракетной ступени
2007	Активный КА «Meteosat 8» столкнулся с крупным некаталогизированным объектом, в результате чего орбита КА изменилась и образовался новый мусор
2009	Столкновение активного КА «Iridium 33» с неактивным КА «Космос-2251»

Одним из последних зафиксированных столкновений, по данным оценок отечественных и зарубежных специалистов [13], является авария КА «Блиц» в середине января 2013 г. Наиболее вероятной причиной аварии КА «Блиц» является его столкновение с мелким фрагментом космического мусора массой  $\approx 0.035$  г и размером менее 2,5–5,0 мм.

С точки зрения наблюдаемости все объекты КМ можно разделить на 2 большие группы [20]: наблюдаемые и ненаблюдаемые объекты КМ. Наблюдаемые объекты КМ представляют собой объекты с поперечным сечением более 5-30 см (в зависимости от характеристик наблюдаемого объекта и орбиты), которые постоянно или периодически сопровождаются средствами наблюдения. Для этих объектов известны параметры их орбит, эффективная поверхность рассеяния, блеск и другие характеристики, измерение которых производится с использованием радиолокационных станций и оптических телескопов. К данной группе объектов относятся отработавшие КА, РН, РБ, объекты КМ, образовавшиеся в результате выведения на орбиту и активного функционирования КА, фрагменты взрывов и разрушений КА, РН и РБ. К категории ненаблюдаемых относятся объекты, образовавшиеся в результате

взрывов и взаимных столкновений КО, а также продукты горения топлива, старения и деградации поверхностей.

Современные средства наблюдения постоянно совершенствуются и нижняя граница размеров наблюдаемых КО уменьшается, но является размытой в связи со сложностью каталогизации объектов малого размера, лишь малая часть таких объектов каталогизирована в настоящее время [1]. На рисунке 1.1.10 представлены обобщенные данные об измерениях КМ разных размеров [15]. Показаны области, где были проведены измерения. Характерной особенностью этих данных является монотонный рост числа объектов по мере уменьшения их размеров. Видно, что в многомерной области «время – высота – размеры КМ» измерения объектов размером менее  $\approx 5$  см были проведены только в относительно небольших локальных регионах. Это обстоятельство характеризует основную трудность достоверной оценки пространственно-временного распределения мелкого КМ. Из данных рисунка видно также, что поток частиц размером более 1 см превышает поток метеороидов. В диапазоне размеров от 1 мм до 1 см эти потоки соизмеримы. При размерах частиц менее 1 мм преобладает поток микрометеороидов. Данные, представленные на графике, отражают состояние техногенного засорения до 2000 г. В настоящее время ситуация резко ухудшилась.

Для оценки техногенного засорения ненаблюдаемым КМ используются модели, построенные на основании имеющейся экспериментальной информации. На рисунках 1.1.11 и 1.1.12 представлены расчетные значения удельного потока КМ размером более заданного для орбиты МКС и солнечно-синхронной орбиты с высотой около 840 км, полученные с использованием последних на начало 2015 г. версий трех признанных моделей космического мусора: модель NASA ORDEM 3.0, модель ЕКА MASTER 2009, отечественная модель Назаренко А.И. SDPA.

Из данных рисунков 1.1.11 и 1.1.12 видно, что различия оценок по разным моделям являются весьма существенными. Особенно это касается оценок потока частиц размером менее 1 см. Для КМ размером более 1 мм отличия достигают 1 – 2 порядков. Данный факт свидетельствует о том, что в диапазоне размеров от 1

мм до 1 см нет экспериментальных данных, достаточных для уточнения моделей КМ с приемлемой точностью. Сравнение данных моделей 2015 г. с измерительными данными, полученными ранее, показывает, что техногенное засорение объектами размером менее 10 см увеличилось на порядок.

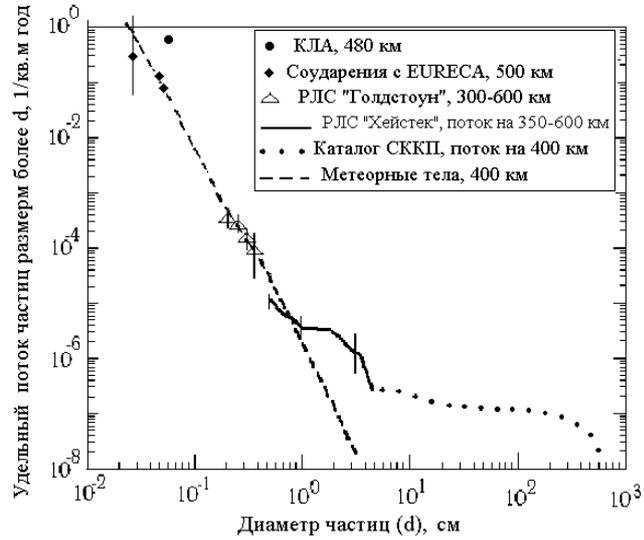


Рисунок 1.1.10 - Характеристики потока космического мусора по данным различных источников

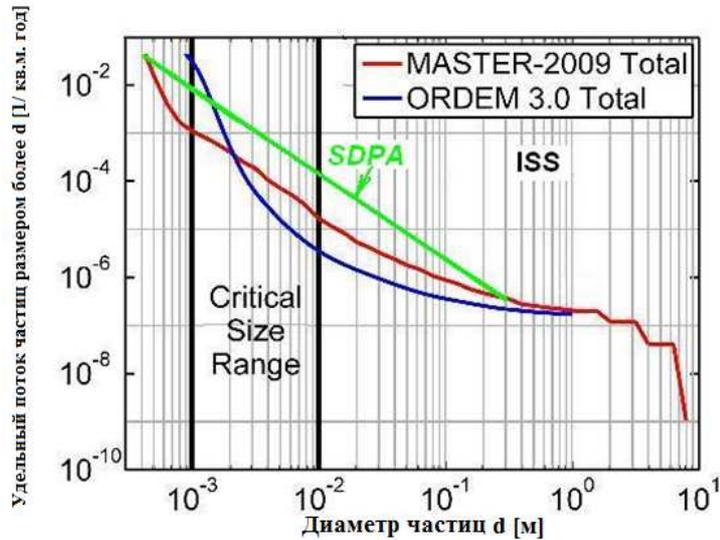


Рисунок 1.1.11 - Характеристики потока космического мусора для орбиты МКС по данным моделей

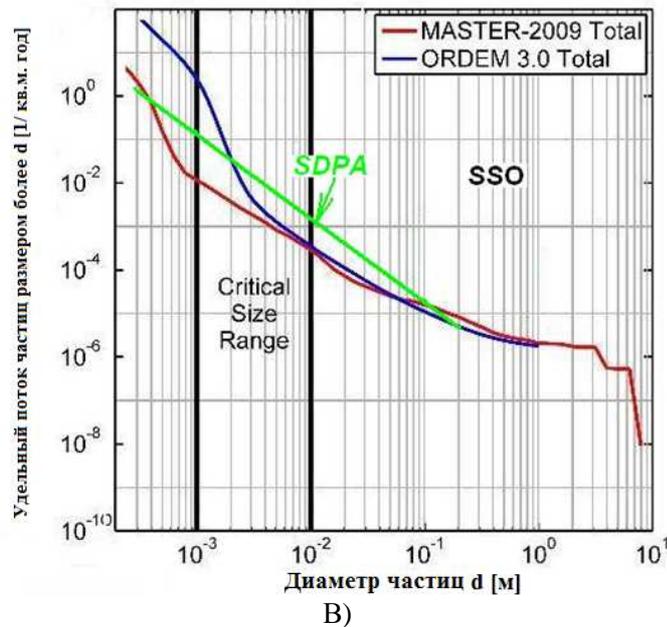


Рисунок 1.1.12 - Характеристики потока космического мусора для солнечно-синхронной орбиты высотой 840 км по данным моделей

Проанализировав историю и состояние техногенного засорения ОКП [21] рассмотрим проблемы (угрозы), связанные с КМ, и методы их решения. Первой проблемой является возможность взаимных столкновений, приводящая к полной или частичной потере функций действующих КА, а также к образованию новых фрагментов КМ. Вторая проблема – это угроза падения не сгоревших в атмосфере объектов на Землю. Третьей проблемой является создание помех для средств наблюдения, что может приводить к получению искаженной информации, а также возможности появления ложных целей. Решение проблем КМ связаны с 3-мя взаимосвязанными задачами, которые необходимо решать, это: предупреждение об опасных ситуациях, защита КА от КМ, ограничение и снижения техногенного засорения. Более подробно методы их решения рассмотрены в схеме на рисунке 1.1.14.



Рисунок 1.1.13 – Проблемы, создаваемые КМ

### Решение проблем

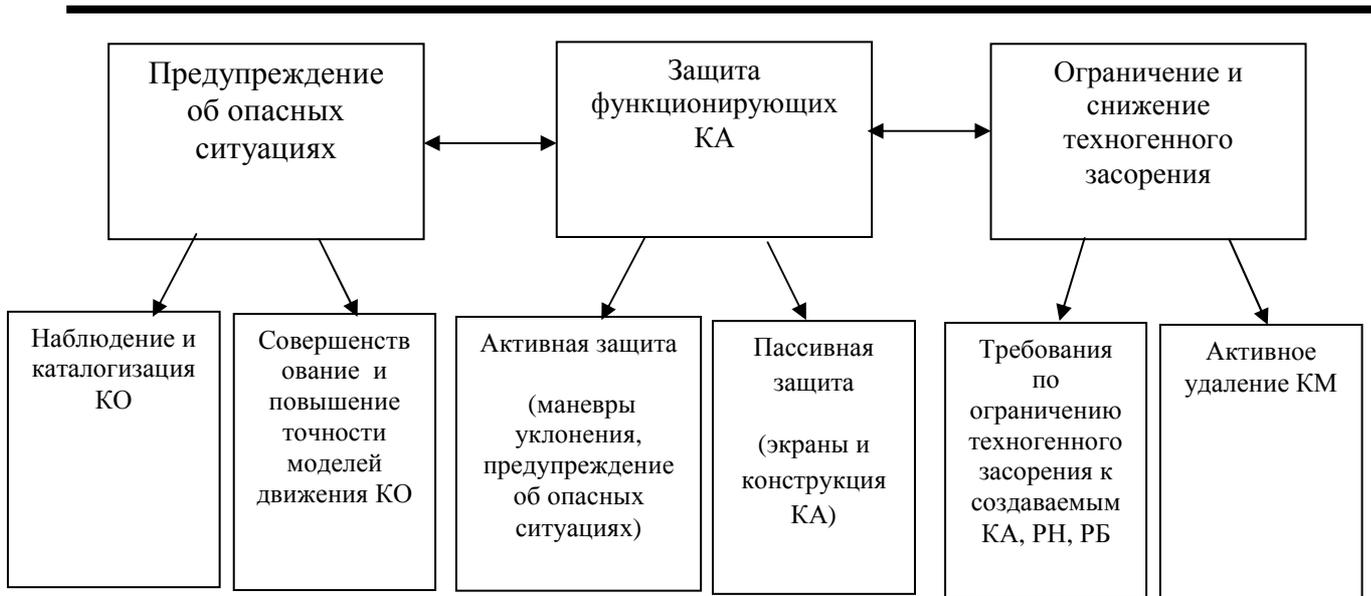


Рисунок 1.1.14 – Методы решения проблем КМ

Предупреждение об опасных ситуациях, связано с решением задач наблюдения и каталогизации КО, совершенствованием и повышением точности моделей движения КО и методик оценки опасных сближений. Защита функционирующих КА осуществляется с использованием специальных экранов и маневров уклонения от столкновения. Задача ограничения и снижения техногенного засорения может решаться путем создания требований по ограничению КМ к новым изделиям ракетно-космической техники и с использованием активного удаления КМ.

Можно выявить всего два фундаментальных средства управления будущим состоянием техногенного засорения ОКП: предотвращение образования и удаление КМ.

Исследование выполнения мер по ограничению техногенного засорения согласно «Руководящим принципам МККМ...» было проведено Европейским [22] и Французским космическими агентствами [23]. На интервале 2000-2012 гг. с использованием базы данных USSSTRATCOM был проведен анализ всех запущенных КА и РН на соответствие требованиям ограничения техногенного засорения, в части их увода по окончании функционирования на орбиты со сроком существования не более 25 лет. На рисунках 1.1.15 и 1.1.16 представлены результаты данного исследования для КА, РБ и ступеней РН. Как видно из гистограмм на данных рисунках, на исследуемом интервале времени около 39% запускаемых КА, РБ и ступеней РН не соответствуют мерам по ограничению техногенного засорения. Причинами данного несоответствия является отсутствие на запускаемых изделиях РКТ специальных устройств увода по окончании функционирования, в следствие чего, 39% из запускаемых объектов будут оставаться на орбитах более 25 лет.

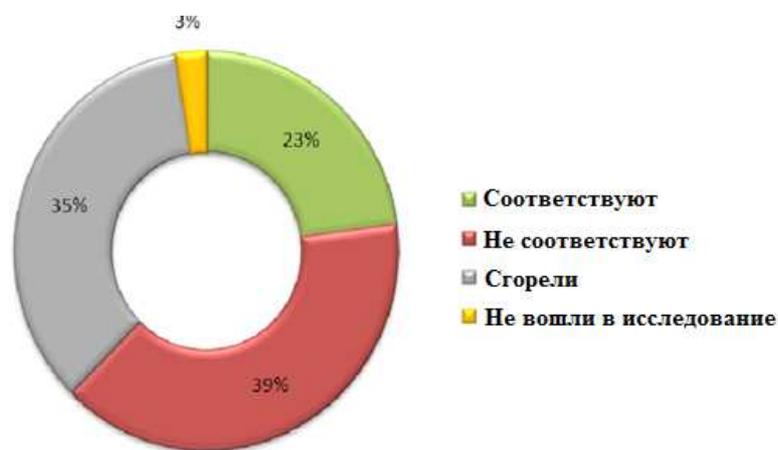


Рисунок 1.1.15 – Соответствие КА мерам по ограничению техногенного засорения



Рисунок 1.1.16. – Соответствие РБ и ступеней РН мерам по ограничению техногенного засорения

Последние исследования в области оценки долговременной эволюции КМ, говорят о недостаточности применения данных мер в долгосрочной перспективе [6 - 10, 13, 24, 25], потому что текущее состояние техногенного засорения достигло уровня, когда взаимные столкновения могут инициировать процесс саморазмножения космического мусора, широко известный как "синдром Кесслера", даже с учетом реализации всех мер по ограничению техногенного засорения. Поэтому, многие специалисты во всем мире приходят к выводу о необходимости «очистки» околоземного космического пространства. При этом наиболее целесообразным для исследования представляется КМ размером более 10 см, т.к. операции активного удаления будут направлены на увод крупных объектов КМ, что в перспективе позволит предотвратить их возможные столкновения с другими объектами, и как следствие образование более мелкого КМ.

Проблема разработки систем активного удаления космического мусора ставится на уровне международных организаций МККМ и НТПК ООН, которые в своих документах призывают способствовать развитию и разработке способов активного удаления КМ.

Теоретические исследования по методам “принудительного” увода нефункционирующих объектов из ОКП в разных странах ведутся более десяти лет. В настоящее время на крупнейших симпозиумах по вопросам КМ главной

задачей ближайшего будущего называют задачу его активного удаления. Однако, в настоящее время нет достаточного обоснования применения конкретных методов удаления и оценки влияния применения данных методов на долгосрочную эволюцию КМ. Рассмотрим предлагаемые на данный момент методы активного удаления КМ [2].

Следует разделить все методы активного удаления на две большие группы по размеру возможности наблюдения удаляемых объектов: методы удаления крупных объектов ( $>10$  см) и удаления мелких объектов КМ ( $<10$  см). В работах [24, 25] дается обоснование необходимости удаления в ближайшем будущем крупных объектов, что является реализуемой задачей и более эффективной, с точки зрения снижения техногенного засорения.

На сегодняшний день все способы очистки космического пространства от объектов КМ можно условно разделить на три большие группы:

- торможение объектов космического мусора с низким перигеем орбиты, с последующим сгоранием КМ в атмосфере Земли или падением в малонаселённых районах;
- разгон или изменение направления вектора скорости КМ на орбитах с высоким перигеем, для увода его на орбиту захоронения;
- уничтожение или дробление КМ различными техническими средствами.

Рассмотрим задачу удаления крупного объекта КМ. Проанализировав [2], можно выделить два концептуально различающихся метода удаления крупных объектов КМ: использование сервисных КА (СКА) для непосредственного удаления КМ или присоединения к ним специальных устройств, решающих эту задачу, использование наземных лазеров или аналогичных систем для дистанционной передачи энергии объектам с целью их удаления.

Возможно, наиболее детальным исследованием наземного лазера, который может быть использован для очистки космической среды, был проект ORION [26], возглавлявшийся НАСА и разработанный для оценки технических и эксплуатационных требований такой системы. Цель состояла в том, чтобы понизить перигей каждого фрагмента мусора до 200 км или ниже, чтобы

гарантировать быстрый вход в атмосферу. Консервативная стоимостная оценка при максимальном использовании существующей инфраструктуры - 100 миллионов долларов в ценах 1995 г. По результатам исследований был сделан вывод о технической и экономической неэффективности в настоящее время такой системы. В настоящее время ведутся работы по исследованию подобного рода способов удаления КМ.

При удалении большого объекта с использованием СКА предполагается близкое сближение и использование сложных методов захвата больших объектов: сеть, надувной лонжерон, закрепленный гарпун, соединительный трос/лассо, электростатическое/клеякое покрытие, также возможны и бесстыковочные методы воздействия на объект для его удаления. Процедура усложняется, если объект вращается или имеет на борту энергоемкие материалы. Исследования различных авторов показали [2], что наличие вращения - главное препятствие при удалении крупноразмерного КМ. Это особенно большая проблема для удаления геостационарных спутников, так как многие из этих спутников стабилизированы вращением. Чтобы остановить вращение геостационарного спутника с двойным вращением потребуется только 0,36 кг топлива при использовании двигателя с удельным импульсом 300 с. Однако, в области НОО большинство объектов имеет небольшой угловой момент из-за комбинации внутренних импульсных устройств, стабилизации градиента гравитации и аэродинамических вращающих моментов. Другая особенность систем предназначенных для активного удаления - большие требования по энергии и топливу. Чтобы максимизировать эффективность, системы должны удалять несколько объектов за каждый полет. Поэтому, в отличие от большинства КА, которые нужно только вывести на орбиту, орбитальные системы удаления мусора должны не только маневрировать между несколькими объектами мусора, но и передать каждому объекту  $\Delta V$  для схода с орбиты или перемещения. Поэтому, назначая группы целевых объектов в узком диапазоне высот и наклонений, было бы очень полезным минимизировать количество маневров между объектами.

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

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

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

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

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

2) разработка сервисных КА для закрепления на целевых объектах КМ автономных тормозящих систем:

– устройства повышения сопротивления КМ при его движении в верхней атмосфере в области НОО;

– электродинамические тросы - проводящие тросы длиной несколько километров, прикрепляемые к удаляемому объекту КМ;

– солнечные паруса – прикрепляются к КМ и за счёт давления солнечного излучения обеспечивают его увод с орбиты;

– модули в составе двигателя и системы управления, которые прикрепляются к крупному КМ и обеспечивают его торможение;

3) разработка сервисных КА для дистанционного воздействия на целевые объекты КМ:

– использование бортовых лазеров для создания механического импульса, действующего на КМ, за счёт эффекта абляции;

– использование ионных пучков для создания механического импульса, действующего на КМ;

4) создание с помощью сервисных КА «ловушек» (большие многослойные сферы, заполненные пеной сотовые структуры и др.) для торможения и сбора мелкодисперсной фракции КМ в районах её наибольшего скопления.

Из предлагаемых технических решений наиболее реально в ближайшей перспективе создание сервисных КА, оснащенных средствами стыковки и увода крупногабаритных объектов КМ.

Рассмотрим различные возможные методы стыковки для удаления КМ. Первый и частично отработанный метод стыковки сервисного КА с использованием роботизированного манипулятора. Аналогичные системы используются на Space Shuttle и МКС для стыковки с различными объектами. Следует отметить, что с использованием таких манипуляторов Space Shuttle совершил как минимум 2 операции удаления объектов из космоса по программам

Hubble и LDEF [2], поэтому применение данной технологии является перспективным, т.к. были реализованные проекты.

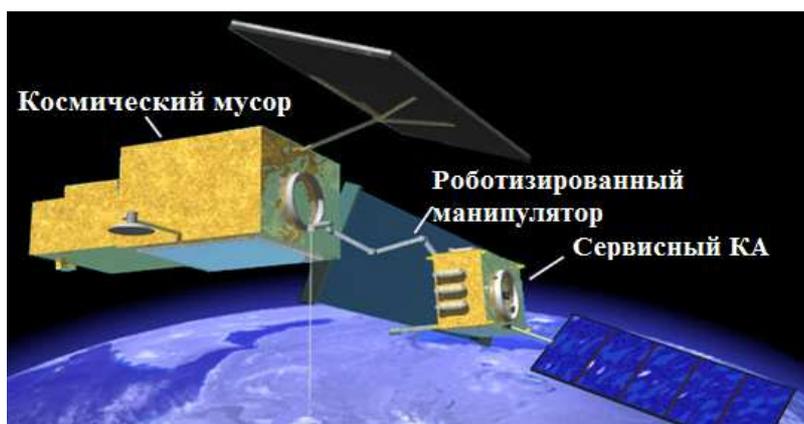


Рисунок 1.1.22. – Применение роботизированного манипулятора для стыковки и удаления объекта КМ

Отличием удаления КМ от описанных выше миссий, выполненных Space Shuttle, заключается в том, что удаляемые объекты были приспособлены к такой стыковке. Данный способ стыковки может быть не всегда эффективным. К положительным качествам данного метода стыковки можно отнести практическую реализуемость и большой опыт применения, отрицательными качествами являются сложность управления манипулятором, применимость не ко всем типам объектов.

Другим методом стыковки может быть использование системы захвата в виде сети, выбрасываемой на расстояние, исключающее столкновение сервисного и обслуживаемого КА. Возможность безопасного захвата спутника-цели с использованием такого способа при различной динамике КА-цели, разных формах и размерах целевых спутников нуждается в доказательстве. К положительным сторонам можно отнести достаточно большие дистанции стыковки, к отрицательным сторонам относятся сложная динамика взаимного движения, отсутствие опыта применения, возможность обрыва троса.

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



Рисунок 1.1.23. – Применение сети для стыковки и удаления объекта

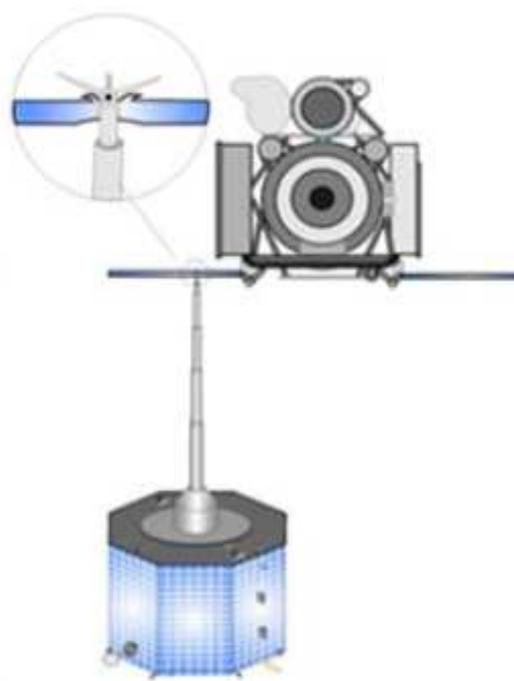


Рисунок 1.1.24. – Применение гарпуна для стыковки и удаления объекта

Одним из перспективных методов, является дистанционное воздействие на удаляемый объект с использованием системы инъекции пучка ионов. Данный метод предполагает использование электроракетной двигательной установки, для увода КМ. Принципиальная схема методики представлена на рисунке 1.1.25. Высокоскоростной ионный пучок генерируется на борту сервисного КА в

непосредственной близости от КА-цели. Ионы ускоряются в двигательной установке КА или ионной пушке до 30 км/с и более. Пучок ускоренной квазинейтральной плазмы, попадая на поверхность КА-цели, воздействует на него с некоторой силой, величина которой существенно зависит от угла расходимости ионного пучка, распыления атомов на поверхности КА-цели, отклонения оси пучка от центра тяжести КА-цели и т.д. Величина расходимости пучка и возможные его отклонения накладывают ограничения на максимальное расстояние между КА и транспортируемым объектом. Такая модель изменения орбиты КМ обладает следующими преимуществами:

- 1) воздействие может быть осуществлено вне зависимости от того, вращается ли КА-цель и какую форму он имеет;
- 2) нет необходимости в разработке специальных захватывающих устройств.

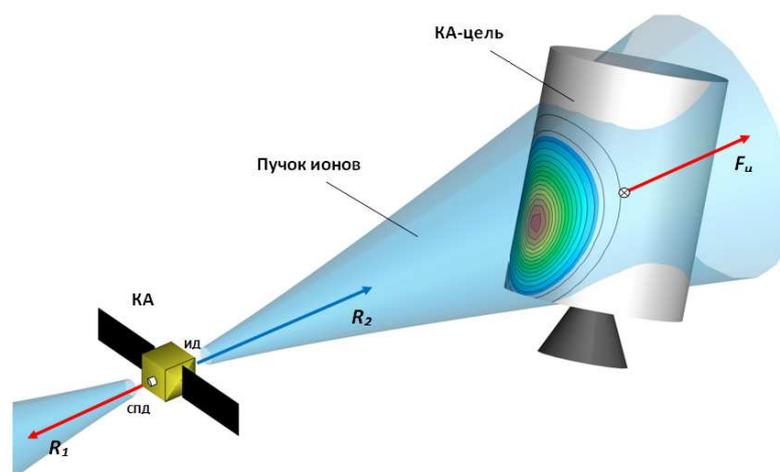


Рисунок 1.1.25 – Принципиальная схема использования пучка ионов и ЭРДУ для воздействия на КМ

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

## **1.2 Постановка задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора на основе статистической модели**

На основании анализа проведенного в разделе 1.1, можно сделать вывод о необходимости исследований долговременной эволюции КМ в области низких околоземных орбит при реализации активного удаления КМ для объектов с размерами более 10 см.

В настоящее время для оценки эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления КМ используется методика [11, 12], основанная на применении «поштучного» описания космических объектов и имитационного моделирования "Монте-Карло". Методика заключается в следующем:

– разыгрывается множество реализаций решения задачи оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит;

– в каждой реализации случайным фактором выступают взаимные столкновения объектов;

– каждый объект в реализации описывается отдельно 10 параметрами:

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;
- 8) долгота восходящего узла;
- 9) аргумент перигея;
- 10) средняя аномалия;

– моделирование ведется с заданным шагом по времени, на каждом шаге с использованием модели движения КО рассчитывается положение всех КО в пространстве;

– все пространство разбивается на «кубики», с заданной величиной стороны, каждый кубик проверяется на наличие в нем 2-х и более объектов, если два объекта попадают в один куб, с использованием алгоритма оценки вероятности столкновения рассчитывается вероятность их столкновения;

– с использованием заданной величины вероятности столкновения, разыгрывается случайное событие столкновения конкретных двух объектов;

– в случае если столкновение считается не произошедшим, продолжается шаг по времени;

– в случае если столкновение считается произошедшим, с использованием модели фрагментации рассчитывается количество образовавшихся в результате столкновения объектов, для каждого объекта рассчитываются все 10 параметров представленных выше;

– Учет активного удаления производится непосредственно в процессе моделирования, на определенных шагах по времени согласно выбранному критерию объекты убираются из процесса моделирования, при этом факт операции активного удаления учитывается только удалением заданного объекта, без учета операции удаления.

Основными недостатками данной методики является большое время вычислений одной реализации, малое количество реализаций при оценке, что приводит к большому разбросу получаемых результатов. В России отсутствуют разработанные методики и программные комплексы, которые позволяли бы применить эту методику.

В качестве альтернативы, разработана методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления КМ, основанная на отдельном моделировании различных групп объектов и использовании статистической модели КМ SDPA [13], разработанной

А.И.Назаренко. Отличительной особенностью разработанной методики является существенно меньшие затраты времени вычислений.

Space Debris Prediction and Analysis model (SDPA) [13] – это статистическая модель для описания и прогнозирования техногенного КМ размером более 1 мм, построения пространственных распределений концентрации и характеристик скорости, а также для оценки риска столкновений. В модели рассматриваются суммарные данные о КМ 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 частиц в инерциальной системе координат. Эти характеристики построены на базе комплексного использования доступной измерительной информации и различных априорных данных. При прогнозировании техногенного засорения учитываются следующие факторы: эволюция под действием верхней атмосферы, последствия взрывов и взаимных столкновений, прирост КМ вследствие новых запусков.

Данная модель не приспособлена для решения задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления. Поэтому разработка методики позволяющей учитывать данный факт, является новой и актуальной задачей.

**Таким образом, целью исследования является обеспечение безопасности функционирования космических систем на низких околоземных орбитах в условиях техногенного засорения.**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

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.

### 1.3 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ техногенного засорения околоземного космического пространства, создаваемых космическим мусором проблем и методов их решения, возможных методов контроля техногенного засорения в будущем, перспективных методов удаления объектов космического мусора.

2. На основании проведенного анализа выявлена новая и актуальная задача разработки методики оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит космическим мусором размером более 10 см при реализации активного удаления на основе отдельного моделирования различных групп объектов и статистической модели, решение которой позволит оценивать долгосрочную эволюцию техногенного засорения низких околоземных орбит для различных сценариев, учитывающих меры по ограничению техногенного засорения и активному удалению, решать задачу оценки эффективности активного удаления КМ для ограничения и снижения техногенного засорения, что позволит проводить анализ большого количества различных сценариев техногенного засорения и на основании результатов данного анализа принимать административные решения по принимаемым мерам его ограничения и снижения.

## **Глава 2. Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора**

Исследование долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления основывается на использовании разработанной методики раздельного моделирования и статистической модели КМ, позволяющих оценить число и последствия взаимных столкновений, а также выполнить прогнозирование техногенного засорения. В данной главе представлено описание разработанной методики, а также математическое описание модернизированных компонент статистической модели КМ, приспособленной для учета активного удаления.

### **2.1 Методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления космического мусора**

При прогнозировании техногенного засорения низких околоземных орбит принимается, что на эволюцию пространственно-временного распределения космического мусора влияние оказывают следующие факторы: прирост новых объектов результате запусков, технологических операций, взрывов, взаимных столкновений и т.п., также торможение в атмосфере, в результате влияния которого происходит уменьшение высоты перигея КО и их сгорание в верхних слоях атмосферы, активное удаление КМ. С учетом введения в действие мер по ограничению техногенного засорения, в настоящее время наблюдается тенденция снижения количества образующегося КМ в результате технологических операций, взрывов и т.п.. Поэтому в настоящее время при прогнозировании техногенного засорения учитывают только прирост количества новых объектов в результате запусков и взаимных столкновений.

Статистическая модель КМ в области низких околоземных орбит (с высотой до 2000 км) использует 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, эксцентриситета и наклона, а также распределение баллистических коэффициентов КО. Особенностью статистической модели КМ [13] является то, что техногенное засорение полностью описывается статистическими распределениями. 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  $D$  будем описывать с использованием модернизированных компонент статистической модели КМ и предусмотренных в ней распределений для решения задач оценки количества взаимных столкновений и последствий столкновений [13]. Основные компоненты модели будут представлены в следующих подразделах.

Подмножества  $ADR$  и  $NEW$  будем описывать 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  $D$  будем осуществлять с использованием подхода, предложенного в статистической модели КМ.

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

Таким образом, суть методики заключается в разделении всего множества объектов на 3 группы таким образом, чтобы в процессе моделирования по времени использовать статистическую модель КМ и элементы "поштучного" описания объектов для учета активного удаления.

Рассмотрим последовательность шагов методики.

#### I. Исходные данные.

– Исходными данными о популяции космических объектов выступают следующие параметры каждого объекта размером более 10 см 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 новых 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 требуемых распределений для подмножества  $D$  и списка параметров 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, характеризующих ее высоту, эллиптичность и наклонение, 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.

– 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. При расчете учитывается допущение, что наклонение КО из области НОО не имеет вековых возмущений и его значение сильно не изменяется под действием возмущающих ускорений, поэтому его орбитальная эволюция не прогнозируется. Угловые распределения имеют равномерное распределение и их прогнозировать для решения данной задачи не нужно. По окончании шага мы имеем перестроенные распределения подмножеств  $D$ ,  $ADR$  и  $NEW$  и параметры объектов подмножеств  $ADR$  и  $NEW$ .

– Если на данном шаге учитывается активное удаление КМ, то 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.

Таким образом, с использованием данной методики можно проводить оценку долгосрочной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит объектами размером более 10 см при реализации активного удаления КМ.

## 2.2 Модель эволюции космического мусора на низких околоземных орбитах

В данном разделе рассмотрены компоненты модели и методика для прогнозирования орбитальной эволюции объектов из подмножеств  $D$ ,  $ADR$ ,  $NEW$ .

### 2.2.1 Эволюционное уравнение прогноза распределения космического мусора по высоте перигея

Используется методика детально изложенная в [13]. Эволюционное уравнение используется для прогнозирования орбитальной эволюции распределения объектов КМ из подмножества  $D$  по высоте перигея. Принимается допущение, что из учитываемых орбитальных параметров только высота перигея оказывает существенное влияние на эволюцию распределения числа объектов КМ по высоте. Плотность распределения объектов КМ по высоте перигея из некоторой группы с определенными значениями других параметров (эксцентриситет, баллистический коэффициент и др.) в момент времени  $t$  обозначим как  $p(h, t)$ .

При расчете эволюции распределения объектов КМ по высоте перигея учитываются следующие факторы: исходное распределение объектов КМ по высоте перигея; разбиение всех объектов на группы по параметрам, отличающихся значениями эксцентриситета и баллистического коэффициента; их торможение в атмосфере на высотах до 2000 км; ожидаемая интенсивность образования нового КМ.

Высота перигея влияет на торможение объектов и изменяется под его воздействием (высота перигея уменьшается, и КА сгорают в атмосфере на высотах около 100 км). Баллистические коэффициенты и размеры КМ в процессе эволюции орбиты практически не изменяются. Значение эксцентриситета уменьшается под действием торможения в атмосфере, но эти изменения не оказывают существенного влияния на долгосрочную эволюцию КМ в области НОО, так как большая часть объектов КМ имеет орбиты с малыми значениями эксцентриситета.

Рассмотрим дискретное распределение  $p(h,t)$  на некотором заданном интервале высот с шагом  $\Delta h$ .

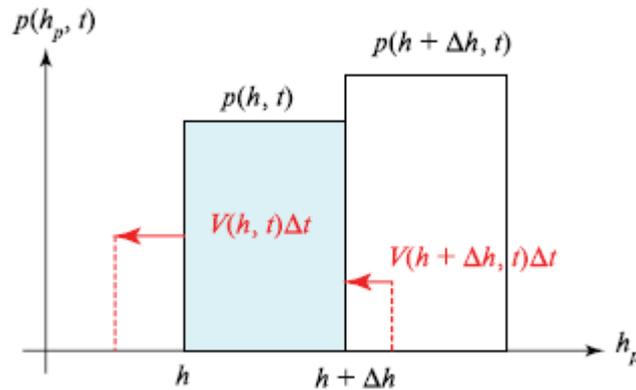


Рисунок 2.2.1 – Распределение объектов КМ  $p(h,t)$  по высоте перигея

На рисунке 2.2.1 рассмотрены значения распределения  $p(h,t)$  для двух значений аргумента  $h$  и  $h+\Delta h$ . В этом интервале высот перигея количество объектов равно

$$N(t)_{h,h+\Delta h} = p(h,t) \cdot \Delta h. \quad (2.1)$$

Пусть  $V(h,t)$  и  $V(h+\Delta h,t)$ - скорость уменьшения высоты перигея объектов с высотой  $h$  и с высотой  $h+\Delta h$ .

Через некоторое время, в момент времени  $t+\Delta t$ , распределение  $p(h,t)$  измениться. В рассматриваемом интервале высот количество объектов (2.1) изменится в результате следующих обстоятельств:

1. в окрестности высоты  $h$  часть объектов снизится настолько, что их высота перигея станет меньше высоты  $h$ , количество этих объектов

$$N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(1)} = V(h, t) \cdot \Delta t \cdot p(h, t), \quad (2.2)$$

2. в окрестности высоты  $>h+\Delta h$  часть объектов снизится настолько, что их высота перигея станет меньше высоты  $h+\Delta h$ , количество этих объектов

$$N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(2)} = V(h + \Delta h, t) \cdot \Delta t \cdot p(h + \Delta h, t), \quad (2.3)$$

3. добавляются вновь образованные объекты, количество этих объектов

$$N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(3)} = p(h, t)_{new} \cdot \Delta h \cdot \Delta t. \quad (2.4)$$

В момент времени  $t+\Delta t$  суммарное количество объектов в рассматриваемом интервале высот перигея будет равно

$$N(t + \Delta t)_{h,h+\Delta h} = N(t)_{h,h+\Delta h} - N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(1)} + N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(2)} + N(t, t + \Delta t)_{h+\Delta h}^{(3)}. \quad (2.5)$$

В момент времени  $t + \Delta t$  плотность распределения объектов по высоте перигея определяется на основе оценки (2.5)

$$p(h, t + \Delta t) = \frac{N(t + \Delta t)_{h, h + \Delta h}}{\Delta h}. \quad (2.6)$$

Соотношения (2.5) и (2.6) позволяют рассчитать при прогнозе на один шаг по времени изменение распределения числа объектов КМ по высоте перигея. Последовательное применение этих соотношений в цикле по высоте и по времени обеспечивает решение задачи прогнозирования распределения  $p(h, t)$  для подмножества объектов  $D$ .

Принимая дискретные значения  $\Delta h$  и  $\Delta t$  бесконечно малыми величинами ( $dh$  и  $dt$ ) соотношения (2.5) и (2.6) можно преобразовать в дифференциальное уравнение в частных производных, которое описывает эволюцию распределения объектов КМ по высоте перигея.

$$\frac{\partial p(h, t)}{\partial t} = V(h, t) \cdot \frac{\partial p(h, t)}{\partial h} + p(h, t) \cdot \frac{\partial V(h, t)}{\partial h} + p(h, t)_{new}. \quad (2.7)$$

С учетом полного дифференциала распределение  $p(h, t)$  в точке  $(h, t)$

$$dp(h, t) = \frac{\partial p(h, t)}{\partial h} \cdot dh + \frac{\partial p(h, t)}{\partial t} \cdot dt. \quad (2.8)$$

С учетом того, что снижение высоты перигея  $v(h, t) = -dh/dt$  подстановка в (2.8) выражения (2.7) приводит к уравнению

$$\frac{dp(h, t)}{dt} = \frac{\partial V(h, t)}{\partial h} \cdot p(h, t) + p(h, t)_{new} = A(t) \cdot p(h, t) + p(h, t)_{new}. \quad (2.9)$$

По своему содержанию - это эволюционное уравнение в дифференциальной форме, а именно линейное неоднородное дифференциальное уравнение, которое позволяет рассчитывать эволюцию во времени распределения объектов КМ по высоте перигея, а соотношение (2.5) - это решение эволюционного уравнения в дискретной форме.

### 2.2.2 Определение скорости снижения высоты перигея

Определения скорости уменьшения высоты перигея объектов  $V(h, t)$  необходимо для решения эволюционного уравнения и прогнозирования высоты перигея и эксцентриситета объектов при заданных других параметрах.

В области НОО одним из основных факторов, влияющих на эволюцию орбит КО, является торможение в верхних слоях атмосферы. Аэродинамические силы, возникающие при движении КО, невелики в сравнении с их значениями в нижних слоях атмосферы, однако большое время полета КО и диссипативный характер влияния приводит к тому, что в области НОО торможение оказывает существенное влияние на эволюцию орбиты КО. Действие силы аэродинамического сопротивления на КО с массой  $m$  вызывает ускорение

$$a = k_b \cdot \rho \cdot V_{rel}^2 \quad (2.10)$$

где величина

$$k_b = \frac{C_x \cdot S}{2m} \quad [\text{м}^2/\text{кг}] \quad (2.11)$$

это баллистический коэффициент,  $\rho$  - плотность атмосферы,  $V_{rel}$  - скорость набегающего потока газа, равная скорости полета КО относительно воздуха,  $C_x$  - безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления,  $S$  - характерная площадь КО. Коэффициент  $C_x$  зависит от многих величин: свойств материала его поверхности, геометрической формы и ориентации КО, состава атмосферы и ее параметров. Для верхних слоев атмосферы в большинстве случаев этот коэффициент находится в пределах 2.00 – 2.50, вследствие чего для определения  $k_b$  можно использовать просто отношение площади к массе КО. Площадь  $S$  - это площадь максимального сечения КО, нормального к вектору скорости  $V_{rel}$ . Для ориентированных КА  $S$  строго определяется его геометрией; для неориентированных КО она оказывается переменной, что приводит к необходимости использования ее средних значений.

Для оценки долговременной эволюции целесообразным является использование формул для возмущения большой полуоси ( $\delta a$ ) и эксцентриситета ( $\delta e$ ) за виток [13], опубликованных в [27, 28].

$$\begin{aligned} \delta a &= -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \frac{a^2}{p} \cdot \exp(-z) \cdot \left\{ I_0(z) + 2eI_1(z) + \frac{3}{4}e^2 \cdot [I_0(z) + I_2(z)] + \dots \right\} \\ \delta e &= -4\pi \cdot (k_b \cdot \rho \cdot p) \cdot \exp(-z) \cdot \left\{ I_1(z) + 0.5e[I_0(z) + I_2(z)] + \frac{1}{8}e^2 \cdot [3I_1(z) + I_3(z)] + \dots \right\} \end{aligned} \quad (2.12)$$

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

Где  $\rho$  - плотность атмосферы в перигее,  $a$  и  $p$  - большая полуось и фокальный параметр орбиты,  $z = a \cdot e / H$ ,  $I_j(z)$  - функции Бесселя мнимого аргумента порядка  $j$ .

Множитель  $(k_b \cdot \rho \cdot p)$  характеризует уровень атмосферных возмущений и является безразмерным. Произведение  $\exp(-z) \cdot \{...\}$  учитывает влияние формы орбиты. Для круговой орбиты ( $e=0$ ) оно равно 1. При увеличении эксцентриситета его значение уменьшается.

Формула (2.12) является приближенной [13]. В фигурных скобках нет слагаемых, пропорциональных  $e^2$ ,  $e^3$  и т.д. Формула (2.12) не учитывает также влияние "вздутия" атмосферы и отличие орбиты КО от эллипса. Суммарная величина этих погрешностей имеет порядок 10%. Такой же порядок погрешностей имеют расчетные значения плотности атмосферы.

Основные погрешности формулы (2.12) для расчета эволюции космического мусора связаны с большим разбросом возможных значений баллистических коэффициентов. Этот разброс достигает 4-го порядка и более. Однако, данными формулами можно пользоваться для решения задачи долгосрочного прогноза снижения высоты перигея [13].

### 2.2.3 Модель верхней атмосферы и солнечной активности

Для определения скорости уменьшения высоты перигея и эволюции большой полуоси и эксцентриситета КО необходимо рассчитывать значения плотности атмосферы с учетом 11-летнего цикла солнечной активности, который оказывает на нее наибольшее влияние. Плотность атмосферы  $\rho$  является пространственно-временной функцией

$$\rho = f(h, \alpha, \delta, F_{10.7}, a_p, C_i, i = 1, 2..). \quad (2.13)$$

Модели верхней атмосферы задают конкретный вид этой функции [29]. Основными аргументами динамических моделей верхней атмосферы являются следующие величины:  $h$  - высота точки над поверхностью Земли,  $F_{10.7}$  - индекс солнечной активности, равный интенсивности радиоизлучения Солнца (1 Solar Flux Units (SFU) =  $10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>·Гц) на волне 10.7 см),  $\alpha, \delta$  - сферические координаты точки в геоцентрической инерциальной системе координат,  $a_p$  (или  $K_p$ ) - индекс, характеризующий геомагнитную активность;  $C_i$  - параметры модели. Высота  $h$  зависит от радиуса-вектора ( $r$ ) и широты точки ( $\varphi$ )

$$h = r - R_E \cdot (1 - \varepsilon \cdot \sin^2 \varphi). \quad (2.14)$$

Наиболее существенным аргументом в модели (2.13) является высота. В относительно небольшом диапазоне высот зависимость плотности от высоты аппроксимируется выражением

$$\rho(h) = \rho(h_0) \cdot \exp\left(-\frac{h - h_0}{H}\right), \quad (2.15)$$

где  $H$  - так называемая высота однородной атмосферы (шкала высот).

Влияние координат  $\alpha$  и  $\delta$  на плотность атмосферы связано с суточным эффектом. Происхождение этого названия объясняется различной степенью разогрева верхней атмосферы в дневное и ночное время. Для решения задачи долгосрочного прогнозирования данными эффектами можно пренебречь, т.к. их влияние на порядок меньше основных факторов, таких как высота и солнечная активность.

Для расчета плотности верхней атмосферы используется модель ГОСТ Р 25645.166-2004 [29]:

$$\rho = \rho_n K_0 (1 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4)$$

$$\rho_n = \rho_0 \exp(a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 h^5 + a_6 h^6) \quad (2.16)$$

Коэффициенты модели (2.16) выбираются в зависимости от индексов солнечной активности, высоты и периода времени, для которого рассчитывается плотность верхней атмосферы. При прогнозировании на большие интервалы времени используются среднегодовые значения  $\bar{F}_{10.7}^{\text{год}}$  – индекса солнечной активности, равного плотности потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см (на частоте 2800),  $10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>·Гц) и средние значения коэффициента  $a_p$ , т.к. он слабо влияет на значение плотности.

Для описания циклов солнечной активности используется модель ГОСТ 25645.302-83 [30]. Среднегодовое значение индекса  $\bar{F}_{10.7}^{\text{год}}$  рассчитывается по формуле

$$\bar{F}_{10.7}^{\text{год}} = a \bar{W}^{\text{год}} + b, \quad (2.17)$$

где,  $a=0.895 \cdot 10^{-22}$  [Вт/( м<sup>2</sup> Гц)] ,  $b= 61.17 \cdot 10^{-22}$  [Вт/( м<sup>2</sup> Гц)],  $\bar{W}^{\text{год}}$  – среднегодовое значение чисел Вольфа. Методика расчета среднегодовых значений чисел Вольфа состоит из расчета чисел внутри 11-ти летнего цикла солнечной активности и расчета чисел каждого следующего цикла солнечной активности.

Для расчета среднегодовых чисел Вольфа внутри текущего цикла, каждое следующее число  $\bar{W}^{\text{год}}$  вычисляют через предыдущее по уравнениям линейных регрессий, приведенных в [30]. Для расчетов необходимо иметь значения  $\bar{W}^{\text{год}}$  для предшествующих двух лет, и знать какие это годы в 11 летнем цикле.

Расчет среднегодовых чисел Вольфа на каждый следующий цикл солнечной активности производится с использованием последнего числа  $\bar{W}_m^{\text{год}}$  и года  $t_m$ . Также используются коэффициенты M и S

$$M = 10 \left( \sum \overline{K_p} - 10 \right) \quad (2.18)$$

$$S = \sum_{i=-1}^{i=-3} (M_i - \overline{W_i^{\text{год}}})$$

где  $M$  – коэффициент, учитывающий изменение индекса геомагнитной активности,  $S$  – коэффициент учитывающий изменение индексов геомагнитной и солнечной активностей,  $\sum \overline{K_p}$  - среднегодовое значение индекса геомагнитной активности  $\sum K_p$  в цикле предшествующем прогнозируемому. Среднегодовые значения чисел Вольфа в следующем цикле также рассчитываются с использованием уравнений линейной регрессии [30].

### 2.3 Методика расчета взаимных столкновений

В данном разделе рассмотрены компоненты модели, с использованием которых рассчитывается количество взаимных столкновений космических объектов множества  $X$ . Для расчета количества взаимных столкновений используются разработанные методики, основанные на отечественной модели КМ SDPA [13, 20, 31-34]. При моделировании КМ в области низких 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, вероятность попадания значений этих элементов в произвольный интервал  $(x, x+\delta)$  равна  $\delta/2\pi$ . В качестве исходных данных для расчета используется распределение только трех элементов орбиты, характеризующих ее высоту, эллиптичность и наклонение  $p(h_n, e, i)$ : высота перигея ( $h_n$ ), эксцентриситет ( $e$ ) и наклонение ( $i$ ).

Для расчета количества взаимных столкновений необходимо рассчитывать величину потока космического мусора  $Q[1/\text{м}^2\text{год}]$  – это количество столкновений сферического КА на заданной орбите с площадью сечения  $1 \text{ м}^2$  с другими объектами. С ее использованием можно рассчитать количество взаимных столкновений на заданном интервале времени.

Для расчета величины  $Q$  необходимо иметь следующие распределения:

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

$Vr(h)$  – распределение радиальной скорости КМ в инерциальном пространстве;

$Vt(h)$  – распределение тангенциальной скорости КМ в инерциальном пространстве;

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

### 2.3.1 Методика расчета концентрации космических объектов

Одной из основных характеристик КМ является концентрация объектов в заданной области пространства [ $1/\text{км}^3$ ]. Это один из показателей текущего уровня засорения околоземного космического пространства КМ. На рисунке 2.3.1 представлено положение заданной точки в ОКП.



Рисунок 2.3.1 – Положение заданной точки в ОКП

Расчет концентрации  $\rho(h, \varphi)$  проводится по следующей методике: распределение  $p(h_n, e, i)$  заданно, распределение других 3-х элементов орбиты (долготы восходящего узла, аргумента перигея и истинной аномалии) считается равномерным. Заданная область в ОКП описывается двумерными «ящичками» по высоте и широте  $h$  и  $\varphi$  с шагом  $\Delta h$  и  $\Delta \varphi$ . Концентрация в одном «ящичке» равна

$$\rho(h, \varphi) = \frac{\Delta N(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta \varphi)}{2\pi(R+h)^2 \cos(\varphi) \Delta h \Delta \varphi} \quad (2.19)$$

В сферическом слое  $(h, h + \Delta h)$  рассчитывается количество объектов  $\Delta N(h, h + \Delta h)$ . С использованием уравнения Кеплера эллиптической теории движения КО, которое связывает положение КО на орбите со временем, рассчитываются временные интервалы  $\Delta t(h_n, e)$ , в течение которых КО с элементами орбиты  $h_n, e$  находится в высотном диапазоне  $(h, h + \Delta h)$ . Нормированная величина  $\Delta \tau(h, h + \Delta h) = \Delta t(h_n, e)/T$ , где  $T$  — период обращения, имеет смысл вероятности, нахождения КО с элементами орбиты  $h_n, e$  в рассматриваемом сферическом слое, т.к. движение КО по истинной аномалии не устойчиво при прогнозе на большие интервалы времени можно использовать данное выражение.

$$\Delta N(h, h + \Delta h) = N_{\Sigma} \int_{h_n} \int_e \Delta \tau(h, h + \Delta h) p(h_n, e) dh_n de \quad (2.20)$$

В широтный слой  $(\varphi, \varphi + \Delta\varphi)$  попадают все КО, у которых  $\sin i > \sin \varphi$ . Время  $\Delta t$ , в течение которого КО пересекает рассматриваемый широтный слой (в общем случае два раза) описывается выражением

$$\Delta t = \frac{T}{\pi} \Phi(h_p, e, h) \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \varphi}} \quad (2.21)$$

где

$$\Phi(h_p, e, h) = \frac{(1-e)^2}{\sqrt{1-e^2}} \left( \frac{h+R}{h_p+R} \right)^2 \quad (2.22)$$

Вероятность  $\Delta P$  попадания КО в область  $(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta\varphi)$  равна произведению вероятностей

$$\Delta P = \Delta \tau(\varphi, \varphi + \Delta\varphi) \Delta \tau(h, h + \Delta h) \quad (2.23)$$

где отношение  $\Delta \tau(\varphi, \varphi + \Delta\varphi) = \Delta t/T$  имеет смысл условной вероятности попадания КО в рассматриваемый широтный слой при условии нахождения его в данном высотном слое  $(h, h + \Delta h)$ . Таким образом

$$\Delta N(h, h + \Delta h, \varphi, \varphi + \Delta\varphi) = N_{\Sigma} \int_i \int_{h_n} \int_e \Delta P p(h_n, e, i) dh_p de di \quad (2.24)$$

В данном выражении интегралы по аргументам  $h_n$  и  $e$  берутся по всей области их возможных значений, а по наклонению  $i$  — только по области, где  $\sin i > \sin \varphi$ .

### 2.3.2 Методика расчета распределений скорости космических объектов в инерциальном пространстве

Для КО, высота перигея и эксцентриситет которых находится в диапазоне значений  $(h_n, h_n + \Delta h_n)$ ,  $(e, e + \Delta e)$ , пролёту некоторого КО через сферический слой с высотами  $(h, h + \Delta h)$  соответствуют значения радиальной и тангенциальной составляющих скорости  $V_r(h_n, e)$  и  $V_t(h_n, e)$

$$V_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}} e \sin \vartheta \quad (2.29)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{\mu}{p}} (1 + e \cos \vartheta) \quad (2.30)$$

где  $p = (h_n + R_e)(1 + e)$ ,  $\mu$  - гравитационная постоянная. Вероятность попадания КО в указанный сферический слой равна

$$P(h, h_n, e) = \Delta \tau(h, h + \Delta h) \cdot p(h_n, e) \cdot \Delta h_p \cdot \Delta e \quad (2.31)$$

где

$$h = \frac{p}{(1 + e \cos \vartheta)} \quad (2.32)$$

$p(h_n, e)$  — статистические распределения высоты перигея и эксцентриситета соответственно. Применение вероятности (2.31), путем суммирования, позволяет построить распределения величины рассматриваемых составляющих вектора скорости для различных высотных слоев.

Направления тангенциальной составляющей скорости характеризуется углом азимута  $A$  (см. рисунок 2.3.1). Значение угла  $A$  зависит от параметров сферического прямоугольного треугольника, у которого известны два катета (угол  $L$  и широта  $\varphi$ ) и наклонение орбиты  $i$ . Для расчета значений  $A$  применяются формулы сферической тригонометрии:

$$\operatorname{tg} i \cdot \sin L = \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.33)$$

$$\sin A = \frac{\cos i}{\cos \varphi} = \frac{\sin L}{\sqrt{\sin^2 L \cdot \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}}. \quad (2.34)$$

Значение азимута находится в том же квадранте, что и значение долготы  $L$ . Имеется однозначное соответствие между направлением вектора скорости и элементами орбиты (2.34).

Положение произвольной точки в ОКП характеризуется координатами: геоцентрическим расстоянием  $r$ , широтой  $\varphi$  и долготой. При решении задачи расчета распределения угла  $A$  удобно в качестве долготы использовать угловое расстояние  $L$  между положением восходящего узла орбиты и меридианом данной точки. При анализе множества пролетов КО через произвольную точку используется допущение, что долгота  $L$  является равномерно распределенной случайной величиной с плотностью распределения

$$p(L) = 1/2\pi. \quad (2.35)$$

Статистическое распределение значений наклонения  $p(i)$  известно. Необходимо построить статистические распределения азимута  $A$  в точках с разной широтой  $\varphi$ .

В частном случае, когда точка находится на экваторе ( $\varphi=0$ ), решение задачи упрощается. Из формулы (2.34) видно, что в этом случае  $A = \frac{\pi}{2} - i$ . Поэтому в данном случае распределение угла  $A$  имеет вид  $p(A) = p(i = \frac{\pi}{2} - A)$ .

Принимая в заданной точке концентрацию  $\rho(h, \varphi)$  известной, определяется число объектов, которые проходят в ее окрестности через нормальное к скорости сечение площадью  $\delta F = \delta r \cdot \delta r$  за единицу времени (один период). Общее число объектов, которые находятся в высотном слое  $(r, r + \delta r)$ , равно  $\delta n = p(h) \cdot \delta r$ , где

$$p(h) = 2\pi \cdot r^2 \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \rho(h, \varphi) \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (2.36)$$

При определении доли объектов (вероятности  $p(A) \cdot \Delta A$ ), которые пролетают через заданный азимутальный сектор  $(A, A + \Delta A)$ , нужно иметь в виду, что только малая часть из числа этих объектов ( $\delta n$ ) пролетает в окрестности данной точки. Необходимо определить число объектов, которые пролетают в окрестности данной точки в азимутальном секторе  $(A, A + \Delta A)$  и на расстоянии  $\delta b$  по бинормали, удовлетворяющем условию

$$\delta b \leq \delta r. \quad (2.37)$$

Выполнение данного условия зависит от двух элементов орбиты: долготы точки  $L$  относительно восходящего узла и наклона  $i$ . При прохождении КО через заданную точку эти параметры связаны соотношением (2.33). Для некоторых заданных значений  $L$  и  $i = f(L, \varphi)$  можно определить отклонения  $\delta L$  и  $\delta i = F(\delta L)$ , при которых выполняется условие (2.37). При заданных априорных распределениях  $p(i)$  и  $p(L)$  определяется искомая доля объектов, попадающих в указанную окрестность

$$\delta n(\delta L) = p(i) \cdot p(L) \cdot \delta i \cdot \delta L. \quad (2.38)$$

Это доля объектов из числа  $\delta n = p(h) \cdot \delta r$ , которые имеют долготу  $L$  в интервале  $(L, L + \delta L)$  и пролетают в  $\delta b$ -окрестности заданной точки.

Необходимо определить область  $S$  значений  $\delta \Omega$  и  $\delta i$  («трубки» траекторий),

для которых выполняется условие (2.37). Как только область  $S$  построена, криволинейный интеграл

$$\delta n(\delta b) = \int_S p(i) \cdot p(L) \cdot dS \quad (2.39)$$

характеризует долю объектов (из числа  $\delta n$ ), которые находятся в этой «трубке». В результате построения области  $S$  вычисление криволинейного интервала можно привести к вычислению обыкновенного интеграла [13]

$$\delta n(\delta b) = \frac{p(L) \cdot \delta b}{2 \cdot r \cdot \sin \varphi} \cdot \int_0^{2\pi} p(i(L)) \cdot \sin i(L) \cdot dL \cdot \quad (2.40)$$

В данном выражении наклонение связано с долготой соотношением (2.33). Общее число объектов, которые пролетают в  $\delta F$ - окрестности данной точки за один период будет равно

$$p(h) \cdot \delta r \cdot \delta n(\delta b) = \frac{\delta F \cdot p(h) \cdot p(L)}{2 \cdot r \cdot \sin \varphi} \cdot \int_0^{2\pi} p(i(L)) \cdot \sin i(L) \cdot dL \cdot \quad (2.41)$$

Нормированное азимутальное распределение удовлетворяет условию

$$\int p(A) \cdot dA = 1 \cdot \quad (2.42)$$

При фиксированной широте в выражении (2.41) множители перед интегралом не зависят от аргумента  $L$ . Их произведение можно считать постоянной величиной ( $k$ ). Поэтому подынтегральное выражение  $p(i(L)) \cdot \sin i(L) \cdot dL$  пропорционально числу объектов (доле от  $\delta n$ ), которые при заданных  $L$  и  $dL$  попадают в  $\delta b$ -окрестность заданной точки. Поэтому вероятность данного события можно представить как

$$dp(L, dL) = k \cdot p(i(L)) \cdot \sin i(L) \cdot dL \cdot \quad (2.43)$$

Т. к. конкретному значению  $L$  соответствует единственное значение угла азимута  $A=f(L)$ , то величина (2.43) имеет смысл вероятности попадания  $P(A, dA)$  объекта в азимутальный сектор  $(A, A+dA)$ , где  $dA = (dA/dL) \cdot dL$ .

Расчет распределения  $p(A)$  с использованием формулы (2.43) проводится для заданного разбиения аргумента  $A$  на «ящички». При достаточно мелком шаге

по долготе  $\Delta L$  по сравнению с шагом  $\Delta A$  оценки  $A=f(L)$  попадают в сектор  $(A, A+\Delta A)$  многократно. Сумма оценок (2.43) всех этих попаданий в сектор  $(A, A+\Delta A)$  и есть оценка распределения  $P(A)$ , т.е.

$$p(A) = \sum dp(L, dL)_{A, A+\Delta A}. \quad (2.44)$$

Для получения корректного распределения  $p(A)$  необходимо, чтобы для набора статистики число этих попаданий было не менее 100. Поэтому по долготе шаг разбиения должен иметь величину не менее  $360^\circ/(N \cdot 100)$ .

### 2.3.3 Методика расчета частоты столкновений и распределений относительной скорости столкновений

Применяемые подходы к оценке взаимных столкновений КО можно разбить на две большие группы: стохастические и детерминированные. Детерминированный подход применим тогда, когда известны орбитальные параметры движения и размеры сближающихся КО. В этом случае на основе использования алгоритмов прогнозирования движения находится точка максимального сближения пары объектов. Если минимальное расстояние между объектами оказывается соизмеримым с их размерами, то возникает опасность столкновения. Однако, в точке максимального сближения погрешности определения положения объектов обычно существенно больше размеров КО. Поэтому вероятность столкновения оказывается маленькой. При расчетах эволюции техногенного засорения на большие интервалы времени целесообразным является использование оценки среднего значения потока КО  $Q$  [1/м<sup>2</sup>год].

В любой момент времени можно рассчитать значение

$$Q(t) = \rho(t) \cdot \int_{A=0}^{2\pi} p(t, A) \cdot V_{rel}(t, A) \cdot dA, \quad (2.45)$$

где  $p(t, A)$  – азимутальное распределение тангенциальной скорости,  $V_{rel}(t, A)$  – относительная скорость объектов КО в заданной точке пространства в момент времени  $t$ .  $Q(t)$  имеет смысл удельного относительного потока объектов в данной точке орбиты, интеграл, входящий в (2.45), имеет смысл средней относительной

скорости КО. В данной формуле учитывается только зависимость плотности распределения частиц от азимута  $A$ . Такое упрощение не является существенным, т.к. основной поток космических объектов расположен в достаточно малой окрестности горизонтальной плоскости. Это является следствием того, что большая часть объектов имеет малые эксцентриситеты. Из выражения (2.45) следует, что величина

$$\Delta Q(t) = \rho(t) \cdot p(t, A) \cdot V_{rel}(t, A) \cdot \Delta A \quad (2.46)$$

имеет смысл удельного потока объектов через азимутальный сектор  $(A, A + \Delta A)$  в текущей точке траектории.

В формулах выше величина  $V_{rel}$  рассчитывается как разница скоростей согласно рисунку 2.3.2.

$$V_{rel} = \sqrt{V_{KA}^2 + V_{SD}^2 + 2 \cdot V_{KA} \cdot V_{SD} \cdot \cos \beta}, \quad (2.47)$$

где  $V_{KA}$  – скорость заданного КО в конкретной точке орбиты, а  $V_{SD}$  – направления скорости других КО.

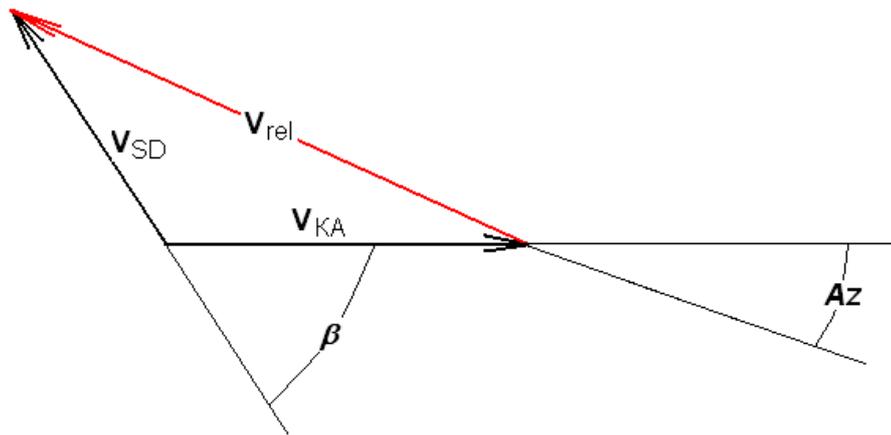


Рисунок 2.3.2 – Пояснение к расчету относительной скорости

Отличительной особенностью данной методики является то, что она, детально учитывает переменность потока КО, как функцию элементов орбит рассматриваемого КО и его положения в ОКП и позволяет на основе полученных формул достаточно просто рассчитать среднее ожидаемое число столкновений КО с другими объектами.

Входящие в правую часть выражения (2.45) переменные являются почти периодическими функциями. Основная входящая в них периодическая составляющая имеет период, равный периоду обращения рассматриваемого КО. Вековая и долгопериодическая составляющие связаны с медленной эволюцией элементов орбиты КО и медленным изменением степени засорения ОКП. Поэтому усреднение потока КО через единичное сечение проводится за 1 виток (период времени, равный периоду обращения КО  $T$ ). Это среднее значение вычисляется по формуле

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^T \rho(t) \cdot \int_{A=0}^{2\pi} p(t,A) V_{rel}(t,A) \cdot dA \cdot dt. \quad (2.48)$$

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

$$N = S \cdot \bar{Q} \cdot (t - t_0) \quad (2.49)$$

Для множества объектов можно оценить среднее количество столкновений как сумму

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M S_i \bar{Q}_i (t - t_0) \quad (2.50)$$

Если объекты сгруппировать по характерной площади  $S$ , тогда количество столкновений можно оценить по формуле

$$N_{\Sigma} = \sum_{i=1}^M N_i S_i \sum_{j=1}^{N_i} \bar{Q}_j (t - t_0), \quad (2.51)$$

где  $N_i$  – количество объектов выделенной группы,  $\bar{S}_i$  – характерная площадь группы объектов,  $\bar{Q}_j$  – среднее значение потока для заданной группы объектов.

Для оценки последствий столкновений, так же необходимо знать статистическое распределение относительной скорости столкновений  $pV_{rel}$  для КО на заданной орбите. Данное распределение зависит от угла между вектором относительной скорости и вектором скорости КА обозначенного как  $A_z$  на рисунке 2.3.2. Угол  $A_z$  зависит от обозначенного выше угла  $A$ , из азимутального

распределения скорости в инерциальном пространстве, и направления вектора скорости КО в данной точке. Диапазон возможных значений этого угла  $(0-2\pi)$  разбивается на  $N$  секторов. Дискретное статистическое распределение  $pV_{rel}(Az)$  рассчитывается на основе соотношения

$$pV_{rel}(Az_j) = \frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} p(t, A_j)_k, \quad (2.52)$$

где  $k_{max}$  – количество случаев попадания направления вектора относительной скорости в сектор  $(Az_j \pm \pi/n)$ . Аналогичным образом определяется средняя зависимость величины относительной скорости от ее направления

$$V_{rel}(Az_j) = \frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} V_{rel}(t, A_j)_k \quad (2.53)$$

Распределение  $pV_{rel}(Az_j)$  удовлетворяет соотношению  $\sum_{j=1}^n pV_{rel}(Az_j) = 1$ . В соответствии с изложенным среднее значение относительной скорости определяется как

$$\bar{V}_{rel} = \sum_{j=1}^n V_{rel}(Az_j) pV_{rel}(Az_j). \quad (2.54)$$

Представленное распределение возможных направлений относительной скорости и соответствующих средних значений характерны тем, что они построены на множестве КО. Произведение средней концентрации объектов  $(\bar{\rho})$  и среднего значения относительной скорости позволяет определить оценку плотности потока частиц заданного вида относительно заданного КО  $-\bar{Q}_\Sigma = \bar{\rho} \cdot \bar{V}_{rel}$ .

При оценке последствий возможных столкновений КО, корректным является усреднение на множестве возможных столкновений. Поэтому для такого типа прикладных задач распределение  $pV_{rel}(Az_j)$  не вполне пригодно. Оно не учитывает разный "вклад" частиц в вероятность столкновения, который пропорционален значению относительной скорости. Для таких случаев необходимо статистическое распределение направлений возможных столкновений, определенное следующим образом:

$$pQ_{rel}(Az) = \frac{V_{rel}(Az) \cdot pV_{rel}(Az)}{\int V_{rel}(Az) \cdot pV_{rel}(Az) \cdot dAz}. \quad (2.55)$$

Соответствующее значение средней скорости столкновений будет равно

$$\bar{V}_Q = \sum_{j=1}^n V_{rel}(Az_j) \cdot pQ_{rel}(Az_j). \quad (2.56)$$

## 2.4 Методика расчета последствий столкновений

В данном разделе рассмотрены компоненты модели, с использованием которых рассчитывается последствия взаимных столкновений КО.

### 2.4.1 Модель последствий взаимных столкновений

В основу модели фрагментации положено известное соотношение [12, 13, 20, 35] для числа образующихся частиц с массой более  $m$ , с коэффициентами  $A=0.4$  и  $B=-0.68$

$$N(> m) = A \cdot (m / M)^B \quad (2.57)$$

Для объектов размером более 10 см данное распределение можно ограничить массой 100 г.

Все столкновения можно разделить на 2 группы: катастрофические и не катастрофические. Для определения типа столкновения используется выделившаяся при столкновении удельная энергия. Формула для определения выделившейся при столкновении энергии является частным случаем более общей формулы, применимой для различных условий столкновений [5]

$$u = U/M = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot V_{rel}^2 \quad (2.58)$$

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 используется  $M = m_1 + m_2$ . Если столкновение не катастрофическое, то используется  $M = m_{min}$ , полностью фрагментируется один объект.

Масса максимального образующегося фрагмента рассчитывается по формуле

$$m_{max} = M \cdot (1 + B) / \left[ 1 + B \cdot (m_{min} / m_{max})^{B+1} \right] \quad (2.59)$$

При столкновении КО, образующиеся объекты получают некоторое приращение скорости  $\Delta V$ , в результате чего параметры их орбит изменяются. Доля выделившейся при столкновении энергии, которая тратится на приращение скорости фрагментов определяется по формуле [13].

$$\Delta V = k_v \cdot u/V. \quad (2.60)$$

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  $\Delta V$  с использованием формулы [43]

$$\Delta h = 4 \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{V}. \quad (2.61)$$

На рисунке 2.4.1 представлено сравнение последствий столкновения спутников Iridium 33 и Космос – 2251 по экспериментальным данным и результатам моделирования. На рисунке слева у части объектов уменьшилась высота апогея вследствие действия атмосферы т.к. данный график построен по измерениям спустя некоторое время после столкновения. На рисунке справа представлено распределение фрагментов после столкновения на основании моделирования по представленным выше моделям.

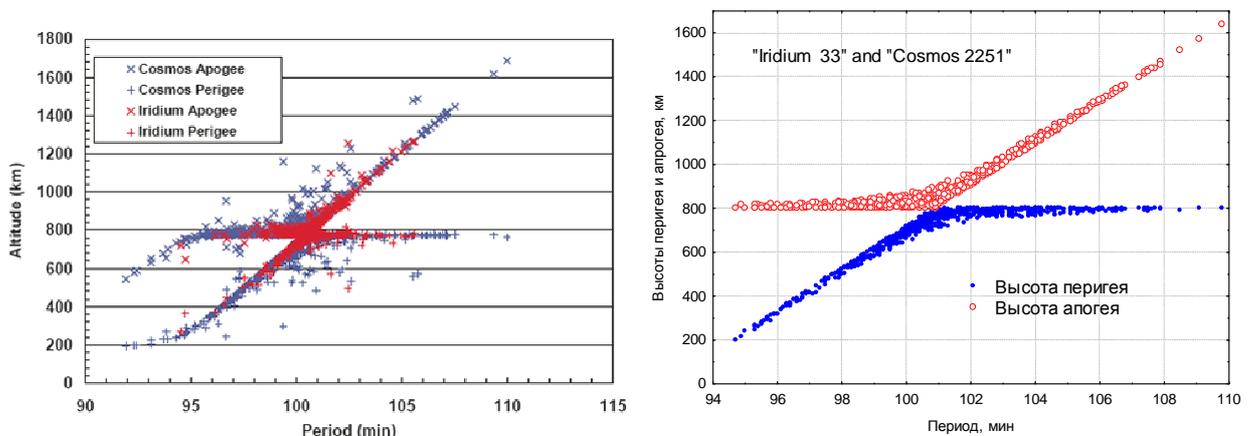


Рисунок 2.4.1 – Сравнение расчетных диаграмм Габбарда столкновения спутников Iridium и Космос с модельными расчетами

## 2.4.2 Методика расчета распределений объектов, образующихся в результате столкновений

Столкновения КО в области НОО имеют следующие случайные факторы, которые наиболее сильно влияют на их последствия: массы сталкивающихся объектов, относительная скорость столкновения, высота столкновения. С учетом данных факторов, необходимо проводить усреднение на множестве возможных столкновений и заданном интервале времени, который используется при прогнозе.

Для расчета усреднённых последствий столкновений используем методика, состоящая из следующих основных операций [13].

1) Выбираются два объекта разного размера.

2) Выбирается высота столкновения в диапазоне высот от 200 до 2000 км (с шагом 100 км), и возможная относительная скорость столкновения.

3) Последствия столкновений рассчитываются с использованием модели фрагментации и усредняются с учётом всех возможных основных влияющих факторов (случайных обстоятельств). При этом учитываются следующие вероятности:

-  $p(h)$  - вероятность столкновения на заданной высоте;

-  $pV_{rel}(A_{z,j})$  - вероятность столкновения с заданной относительной скоростью;

-  $p(m1)$  и  $p(m2)$  – вероятность того, что объекты будут иметь массы  $m1$  и  $m2$ .

Вероятность столкновения объектов в каком-либо высотном слое пропорциональна квадрату концентрации объектов в данном высотном слое.

Выходными данными являются математическое ожидание и дисперсия распределения  $N(h)_{new}$  числа ежегодно образующихся фрагментов размером более заданного по высоте перигея. Распределение наклонов для образующихся фрагментов, соответствует исходным распределениям наклонов популяции КМ, потому что анализ событий фрагментации показал незначительное изменение наклонов объектов при разрушениях в области НОО, т.к для изменения наклона на НОО требуются большие характеристические скорости.

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Разработана методика оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления на основе отдельного моделирования и статистической модели.

2. Сформирован и модернизирован набор компонентов модели космического мусора для оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления, а именно для расчета:

- орбитальной эволюции,
- количества столкновений,
- последствий столкновений.

### Глава 3.

## **Программный комплекс для оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления**

Достоверность результатов оценки обуславливается корректностью использованных математических моделей и алгоритмов. Однако важную роль в этом играет и разработка программно-математического обеспечения, в котором реализованы все разработанные модели и методики.

В настоящее время при построении архитектуры и состава программно-математического обеспечения используются принципы объектно-ориентированного программирования. Объектно-ориентированное программирование - технология программирования, при которой программа рассматривается как набор дискретных объектов, содержащих, в свою очередь, наборы структур данных и процедур, взаимодействующих с другими объектами.

Программный комплекс разработан на базе кроссплатформенного языка программирования Free Pascal и среды разработки Lazarus. Выбор в пользу использования данной среды разработки был связан со следующими обстоятельствами:

- 1) свободное распространение, что позволяет использовать бесплатно среду разработки и разработанное программное обеспечение, которое можно лицензировать,
- 2) кроссплатформенность, что позволяет скомпилировать программы, разработанные с использованием данной среды, на все основные операционные системы: Windows, Linux, MacOS.

### 3.1 Структура программного комплекса

На рисунке 3.3.1 представлена структурная схема программно-математического обеспечения для решения задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления. Программный комплекс структурно состоит из 3 больших взаимосвязанных модулей: интерфейса пользователя, модуля математической модели и модуля преобразования входных и выходных данных.



Рисунок 3.3.1 – Структура программного комплекса

### 3.2 Описание программных модулей

Программный комплекс состоит из нескольких взаимосвязанных блоков, которые используются для расчетов различных характеристик.

#### Модуль подготовки исходных данных

Исходными данными для вычислений служит матрица, в которой каждый объект описывается отдельно с использованием данных, представленных в методике, раздел 2.1. В модуле данные для объектов КМ подмножества  $D$  из матрицы преобразуются в распределение объектов по орбитальным параметрам  $P(h_p, e, i)$ , распределение баллистического коэффициента  $P(k_b, h_p)$  с использованием сортировки по «ящикам» распределений с заданными границами значений параметров. Формируется матрица с параметрами объектов подмножества  $ADR$ , для которых также строятся аналогичные распределения. Для всех объектов строится распределение масс объектов  $P(m)$  для расчета математического ожидания и дисперсии количества образующихся в результате столкновений объектов.

#### Модуль расчета концентрации

С использованием распределения  $P(h_p, e, i)$  для множества всех объектов  $X$  по методике, представленной в разделе 2, в данном модуле рассчитывается концентрация объектов в зависимости от высоты и широты для области НОО.

#### Модуль расчета распределений скорости

С использованием распределений  $P(h_p, e, i)$  для множества всех объектов  $X$  по методике, представленной в разделе 2, в данном модуле рассчитываются распределения скорости в инерциальном пространстве всех объектов в области НОО.

#### Модуль расчета столкновений

С использованием распределений, рассчитанных в модулях расчета концентрации и расчета распределений скорости для всех возможных групп объектов, рассчитывается распределение относительной скорости столкновений для различных высот и оценка количества взаимных столкновений в области НОО.

### Модуль расчета последствий столкновений

С использованием распределений вероятности столкновений по высоте, массе сталкиваемых объектов и относительной скорости столкновений рассчитывается математическое ожидание и дисперсия образующихся объектов в области НОО по высоте перигея.

### Модуль выбора объектов для активного удаления космического мусора.

С использованием информации об объектах подмножества *ADR* производится расчет значения критерия выбора объектов для активного удаления космического мусора. Объекты с максимальным значением критерия, согласно сценарию, удаляются из данного подмножества, после чего перестраиваются распределения для подмножества *ADR*.

### Модуль прогноза КМ

Данный модуль решает задачу прогноза для каждого подмножества отдельно. Первым шагом добавляются новые объекты в подмножество *NEW*, согласно сценарию и данным о них. Данным объектам присваивается уникальный идентификатор для учета мер по ограничению техногенного засорения. Для подмножества *D* прогноз осуществляется с использованием уравнений эволюции распределения объектов по высоте перигея. Для подмножеств *ADR* и *NEW* с использованием информации о каждом объекте из группы прогноз осуществляется по приближенной методике для высоты перигея и эксцентриситета.

### Модуль расчета выходных данных

В данном модуле происходит обобщение результатов расчета и сохранение их в отдельные файлы.

### Модуль интерфейса

В данном модуле описан интерфейс для формирования исходных данных и сценариев прогнозирования. На рисунках 3.2.1 – 3.2.5 представлены рабочие окна программы для ввода параметров моделирования и вывода результатов.

Программа для расчета эволюции космического мусора.

Файл | Справка

Данные для расчета | Результаты | Поиск прироста | Моделирование столкновений

D [см]	H [km]	S	e	dKd	N [шт]
10	150	0.005	0.001	1	19630
	250	0.01	0.0035		
	350	0.02	0.0075		
	450	0.03	0.015		
	550	0.04	0.04		
	650	0.05	0.08		
	750	0.1	0.2		
	850	0.15	0.4		
	950	0.5			
	1050	1.5			
	1150				
	1250				
	1350				
	1450				
	1550				
	1650				
	1750				
	1850				
	1950				

Начальные параметры для расчета

Число диапазонов размеров: 1

Число диапазонов высот: 19

Число диапазонов баллистических коэффициентов: 10

Число диапазонов эксцентриситетов: 8

Параметры моделирования

Произвести расчёт

Год начала и окончания моделирования

2013 2213

Рисунок 3.2.1 – Форма для ввода сеток распределений

FormModelizedParam

Параметры распределений характеризующих КМ [Параметры]

Учитывать прирост вызванный новыми запусками(или усреднённый прирост от всех факторов) [Параметры]

Учитывать взаимные столкновения [Параметры]

Учитывать последствия взрывов [Параметры]

Учитывать активный уход [Параметры]

Учёт времени активного существования после которого спутники уводятся: 0

PMD %: 90

Рисунок 3.2.2 – Форма ввода параметров сценария для расчета

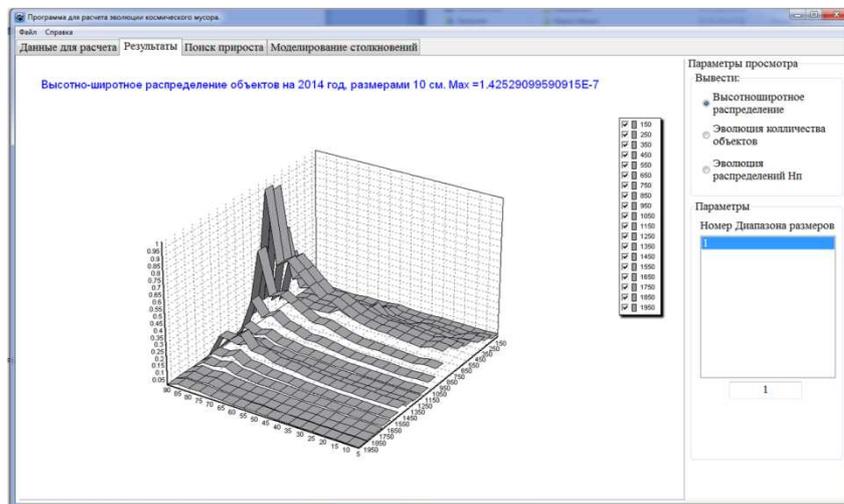


Рисунок 3.2.3 – Форма вывода концентрации по итогам расчета

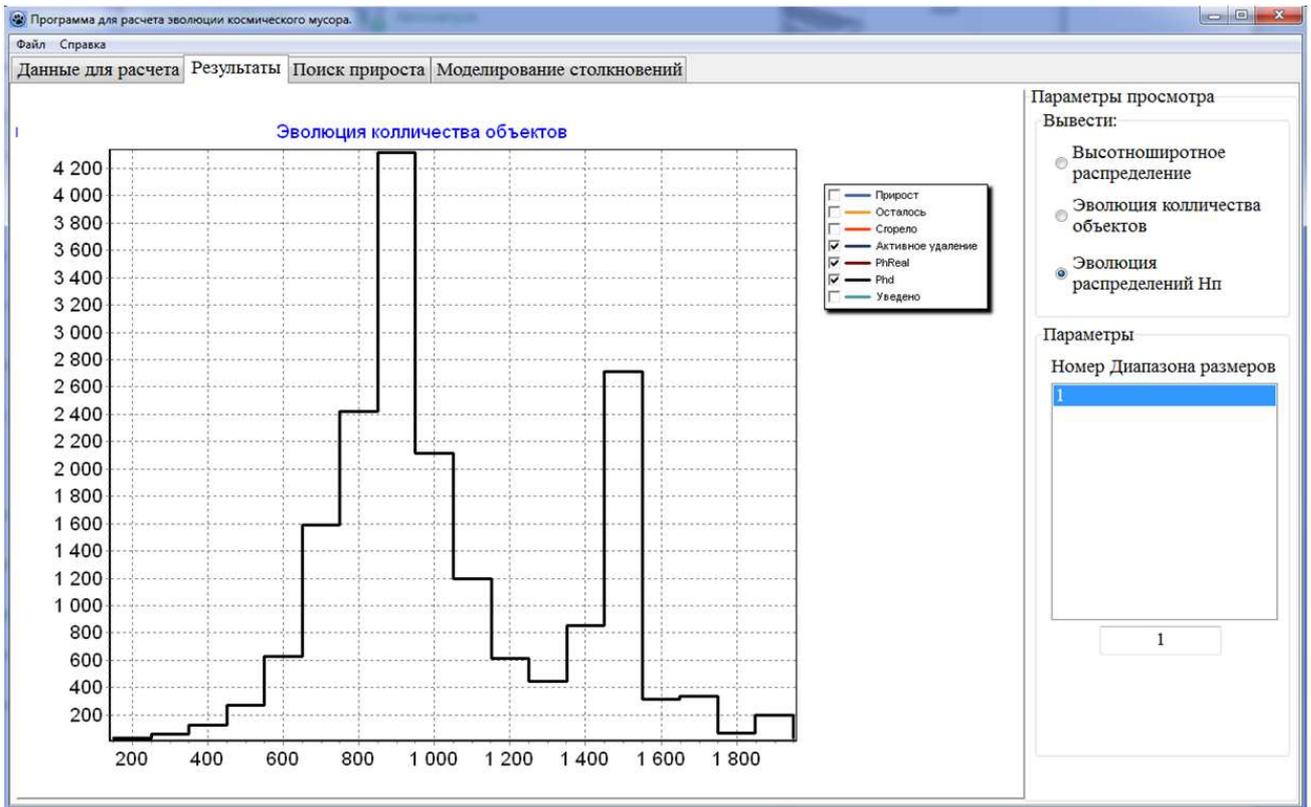


Рисунок 3.2.4 – Форма вывода распределения высоты перигея по итогам расчета

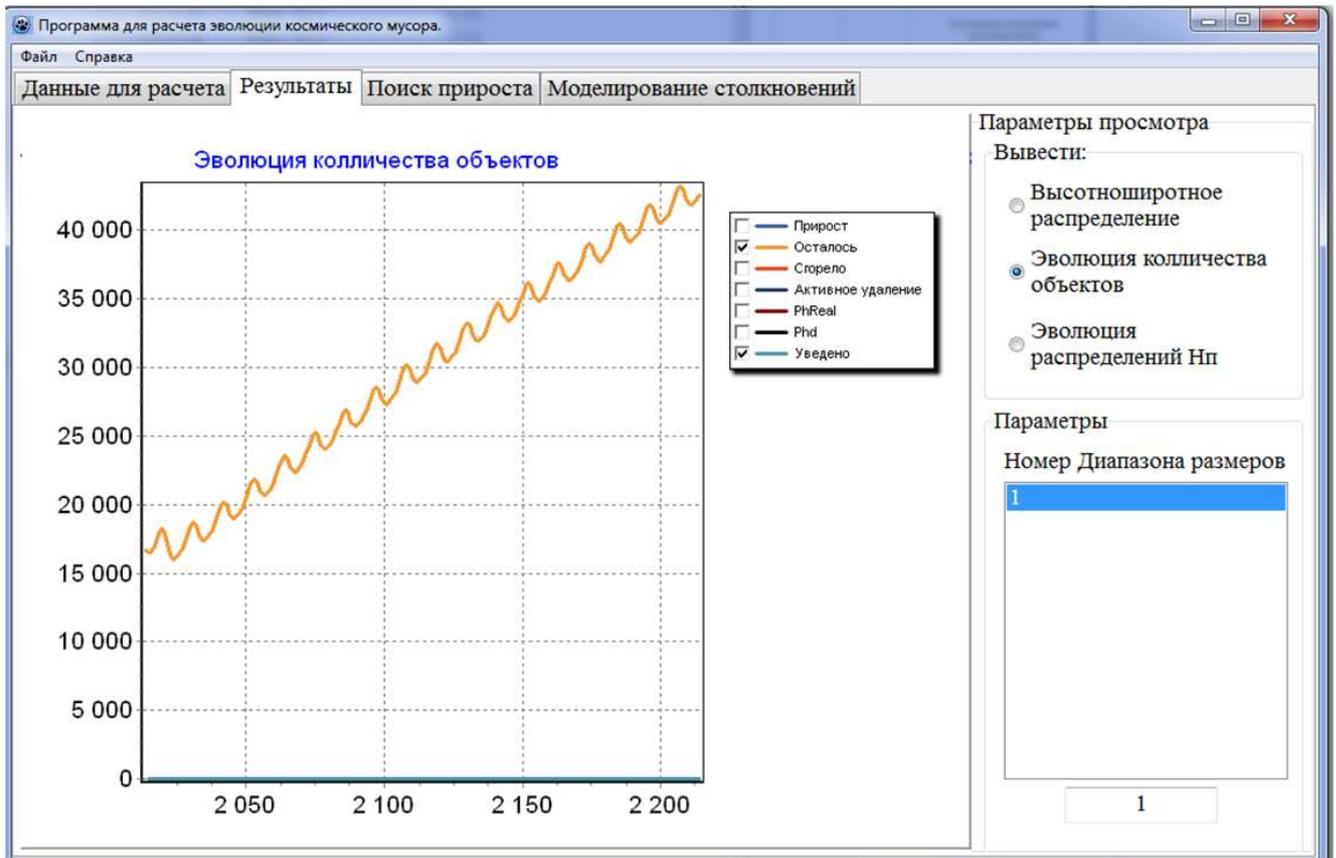


Рисунок 3.2.5 – Форма вывода эволюции количества объектов по итогам расчета

### **3.3 Выводы по главе 3**

1. Разработаны основные принципы построения программно-математического обеспечения для решения задачи оценки долговременной эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора.

2. Разработано программно-математическое обеспечение с возможностью использовать различные исходные данные и проводить многократный анализ.

## **Глава 4.**

### **Оценка эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора**

В главе представлены результаты использования разработанного программного комплекса и методики оценки долговременной эволюции техногенного засорения при реализации активного удаления космического мусора для разных сценариев согласно исходным данным, разработанным Межагентским координационным комитетом по космическому мусору. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Сделаны рекомендации по областям, в которых в первую очередь необходимо проводить операции активного удаления космического мусора.

#### **4.1 Сценарий и исходные данные**

##### **4.1.1 Сценарий моделирования**

В рамках работ Межагентского координационного комитета по космическому мусору в 2013 г. [36] была утверждена работа по оценке эффективности активного удаления космического мусора на состояние техногенного засорения в области НОО, в которой принимает участие 9 космических агентств. Основной целью исследования является количественная оценка использования активного удаления КМ для управления будущим состоянием техногенного засорения в области НОО и разработка технических основ для обоснования требований по активному удалению КМ. До настоящего времени сценарии прогнозирования техногенного засорения не включали в себя факт активного удаления КМ.

В рамках данной работы были утверждены основные исходные данные. Используются 12 сценариев, в каждом учитываются регулярные запуски новых объектов. Из них 3 сценария без активного удаления, в которых учитываются меры по ограничению техногенного засорения - соответствие 30%, 60% или 90%

из запущенных объектов "правилу 25 лет" (новые запускаемые объекты 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 (на английском Active Debris Removal (ADR)) разработаны 9 сценариев, в которых помимо мер по ограничению учитывают одно из 3 значений количества уводимых в год объектов: 2, 5, 8 объектов в год с наибольшим значением произведения массы объекта на вероятность столкновения.

Базовый сценарий включает в себя следующие положения:

- 1) исходные данные о количестве объектов размером более 10 см представлены Европейским Космическим Агентством (ЕКА) на 1 января 2013 г.;
- 2) запуски новых объектов дублируют 8-ми летний цикл запусков с 1 января 2005 г. по 1 января 2013 г., который повторяется циклически при прогнозе; данные об объектах представлены ЕКА;
- 3) для новых запущенных КА задано время функционирования – 8 лет;
- 4) 30%, 60 %, 90 % из новых запускаемых объектов соответствуют правилу 25 лет;
- 5) взрывов не происходит;
- 6) маневры уклонения от столкновений не производятся;
- 7) в столкновениях участвуют все объекты размером более 10 см;
- 8) за исключением положений, описанных в сценарии, могут применяться любые модели, которые будут сочтены нужными;
- 9) прогноз осуществляется на 200 лет.

Сценарий активного удаления КМ:

- 1) активное удаление КМ начинается с 2025 года;
- 2) критерий выбора объектов для удаления:
  - 1) исключаются функционирующие КА;
  - 2) исключаются объекты с высотой перигея более 2000 км;
  - 3) исключаются объекты со значение эксцентриситета более 0.5;

- 4) исключаются фрагменты;
- 5) исключаются РБ и КА со сроком орбитального существования менее 25 лет;
- 6) выбираются объекты с максимальным значением произведения массы на вероятность столкновения;
- 7) удаляются 2, 5, 8 объектов.

Всего с учетом изложенных выше положений рассматривается 12 сценариев:

- без удаления 30%; 60%; 90% PMD;
- с удалением: 2 объекта + 30%; 60%; 90% PMD;  
5 объектов + 30%; 60%; 90% PMD;  
8 объектов + 30%; 60%; 90% PMD;

#### 4.1.2 Исходные данные

Для проведения расчетов использовались исходные данные, представленные ЕКА (рисунок 4.1.1). Исходные данные состоят из таблицы, в которой каждому объекту присваиваются: идентификационный номер (1 – РБ или последние ступени РН, 2 – КА, 3 – Операционные элементы, связанные с выполнением программ полета КА, 4- КМ), масса объекта, характеристика продольного диаметра, характерна площадь, большая полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$ , наклонение, долгота восходящего узла RAAN или  $\Omega$ , аргумент перигея AoP или  $\omega$ , средняя аномалия  $M$ , дата запуска для объектов, которые были запущены в последние 8 лет.

1	#	Created by	Institute of	Aerospace Systems, Technische Universität Braunschweig (October, 2013)							
3	#	Descriptive #									
5	#	Initial population for epoch 1/1/2013 for objects with Lc equal to or larger than 10 cm									
8	#	ID: 1 = R/B, 2 = P/L, 3 = MRO, 4 = DEB									
9	ID	Mass	Diameter	Area	a	e	i	RAAN	AoP	M	LA-DATE
10	#	[kg]	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[km]	[-]	[deg]	[deg]	[deg]	[deg]	[yyyy-yyyy]
11	2	7.10E+03	5.68E+00	25.3441	6788.5	0.0014	51.6	113.06	169.18	113.06	2012.965
12	2	4.58E+03	5.91E+00	27.4302	6727.5	0.0011	43.4	5.72	57.87	5.72	2012.943
13	2	9.40E+02	3.93E+00	12.145	7076	0.0001	98.2	166.18	196.19	57.87	2012.918
14	2	7.29E+03	5.00E+00	19.6153	6788.5	0.0014	51.6	91.76	343.16	72.16	2012.831
15	2	7.22E+03	5.68E+00	25.3441	6788.5	0.0014	51.6	199.85	37.36	312.79	2012.809
16	2	4.50E+01	6.59E-01	0.3415	6995.5	0.0224	64.6	26.33	231.26	147.92	2012.7
17	2	1.00E+00	1.32E-01	0.0137	7012	0.0208	64.6	295.76	309.7	327.14	2012.7
18	2	1.00E+00	1.32E-01	0.0137	7009	0.0211	64.6	175.87	149.6	255.23	2012.7
19	2	1.00E+00	1.32E-01	0.0137	7006.5	0.0215	64.6	110.46	329.3	113.1	2012.7
20	2	4.00E+00	1.85E-01	0.0268	7004.5	0.0219	64.6	27.72	298.83	281.72	2012.7
21	2	4.00E+00	1.85E-01	0.0268	7003	0.0221	64.6	104.47	252.68	252.03	2012.7
22	2	4.00E+00	1.85E-01	0.0268	7003	0.0221	64.6	202.41	45.45	61.4	2012.7

Рисунок 4.1.1 – Исходные данные, представленные ЕКА

Согласно представленной выше методике, с использованием этих данных были построены распределения  $P(h_n, e, i)$ ,  $P(h_n, k_b)$  путем сортировки объектов по "ящикам" с заданными граничными параметрами. Для расчетов были выбраны шкалы разбиения аргументов, представленные в таблице 4.1.1. Шкалы были выбраны исходя из анализа работ [13, 20], в которых обосновывается выбор данных диапазонов. Разбиение по высотам с шагом в 100 км берется исходя из устойчивости данного распределения на интервале 1 год при использовании прогноза распределения высоты перигея. Разбиение наклонов с шагом  $2.5^0$  т.к. данное распределение является сильно изрезанным и разброс наклонов в окрестности локальных максимумов не превышает  $5-8^0$ . Распределение эксцентриситетов выбрано исходя из влияния атмосферы на торможение объектов. Границы распределения масс выбраны с учетом исходных данных.

Таблица 4.1.1 – Шкалы разбиения аргументов

Параметр	Шкала													
$h_n$ [км]	100 – 2000 км с шагом 100													
$e$	1	2	3	4	5	6	7	8						
	0.0000- 0.0035	0.0035- 0.0075	0.0075- 0.0150	0.015- 0.040	0.04- 0.08	0.08- 0.20	0.20- 0.40	>0.40						
$i$ [град]	0 – 150 град с шагом 2.5													
$k_b$ [м <sup>2</sup> /кг]	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
	0.000- 0.005	0.005- 0.020	0.02- 0.03	0.03- 0.050	0.05- 0.1	0.1- 0.15	0.15- 0.5	0.5- 1.5	>1.5					
$m$ [кг]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	0.05- 0.1	0.1- 0.5	0.5- 1	1- 5	5- 10	10- 50	50- 100	100- 500	500- 1000	1000- 2000	2000- 4000	4000- 7000	7000- 10000	>10000

На рисунках 4.1.2-4.1.5 представлены результаты обработки исходных данных о популяции КМ. Для упрощения представления трехмерного массива данных, представлены распределения объектов по отдельным параметрам.

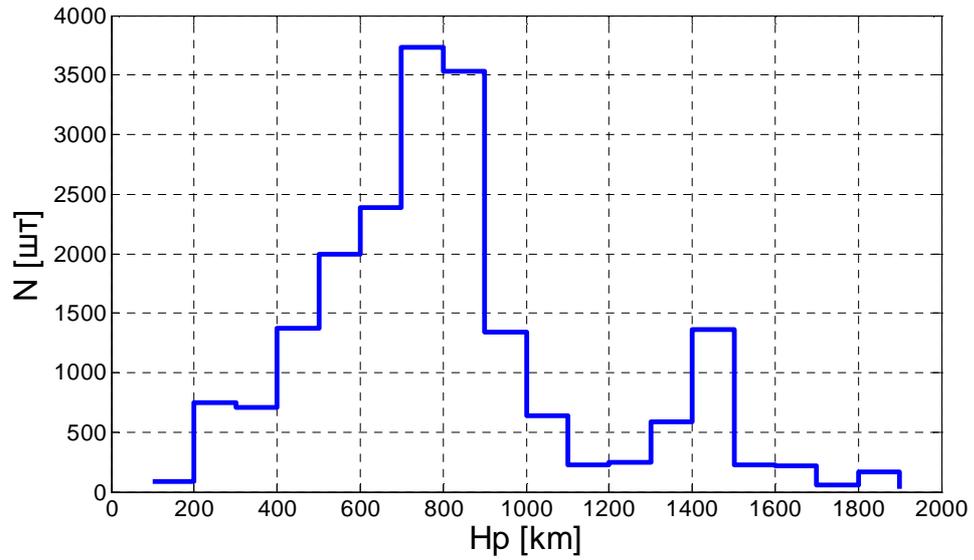


Рисунок 4.1.2 – Распределение объектов по высоте перигея

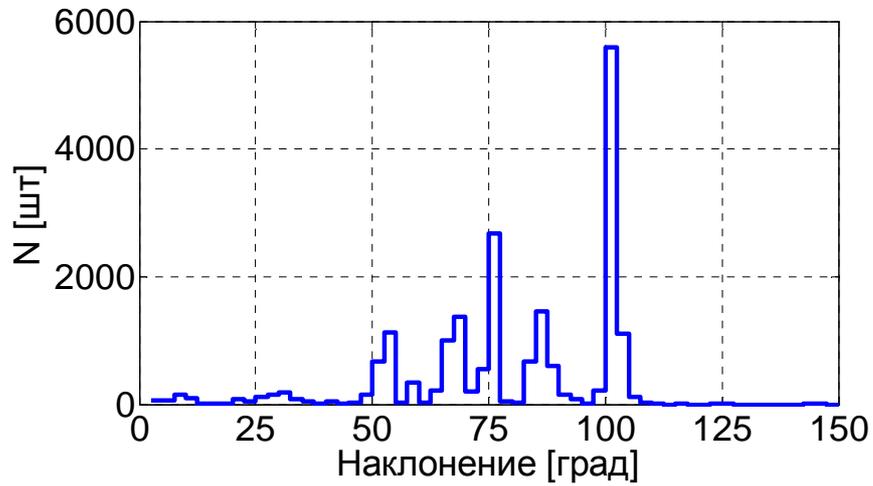


Рисунок 4.1.3 – Распределение объектов по наклонению

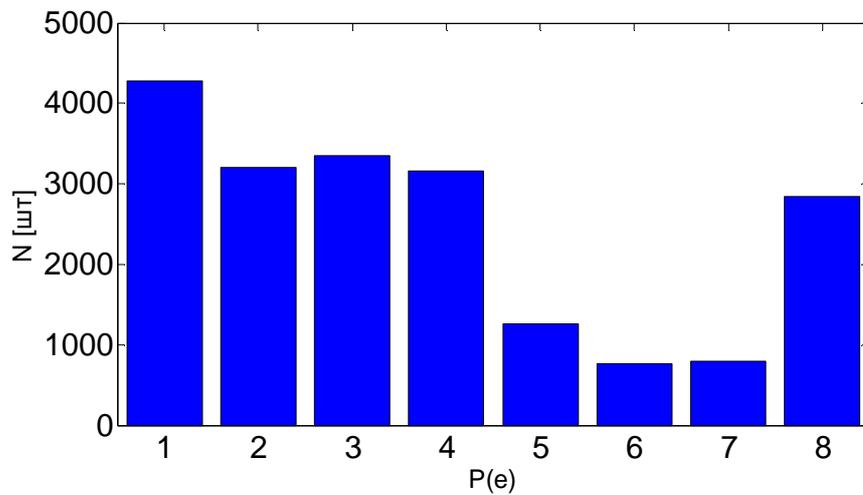


Рисунок 4.1.4 – Распределение объектов по группам эксцентриситета

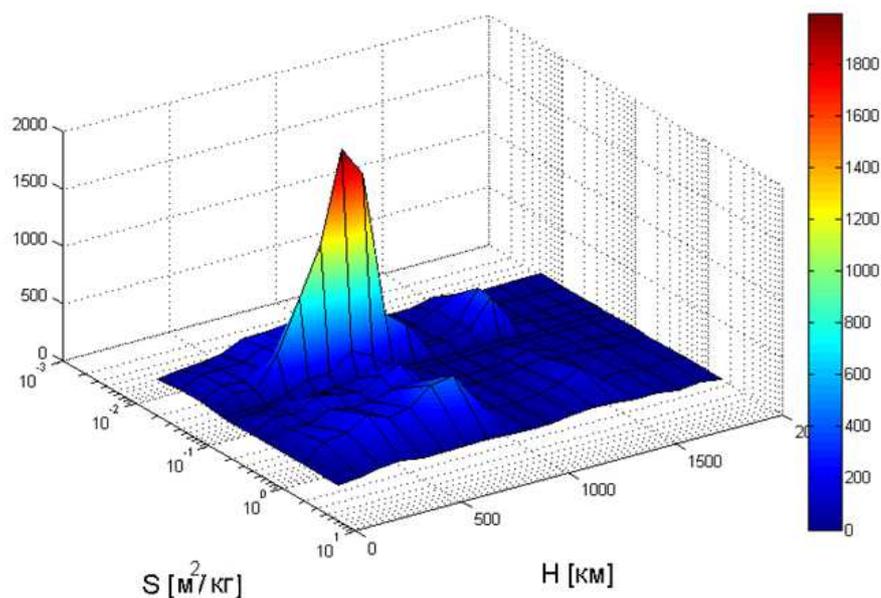


Рисунок 4.1.5 – Распределение объектов по высоте перигея и баллистическому коэффициенту

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

На рисунках 4.1.6 – 4.1.9 представлены результаты расчета распределений концентрации и распределений скорости в инерциальном пространстве по исходным данным.

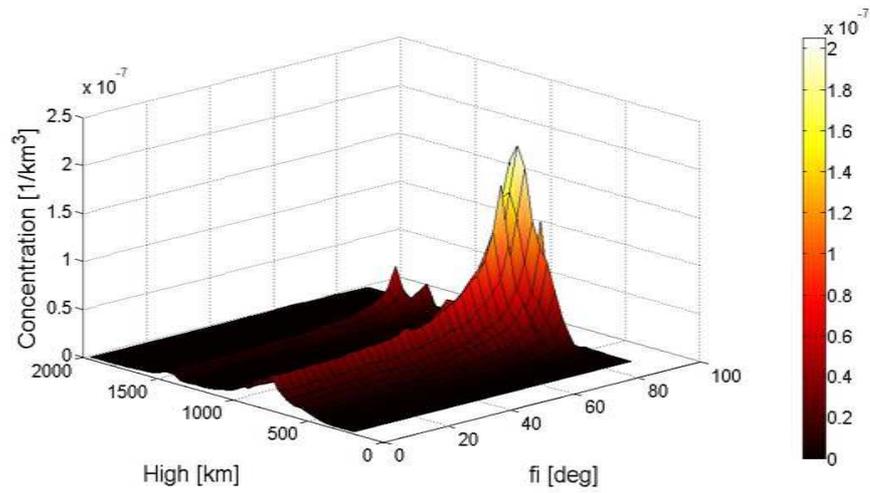


Рисунок 4.1.6 – Распределение концентрации объектов от высоты и широты

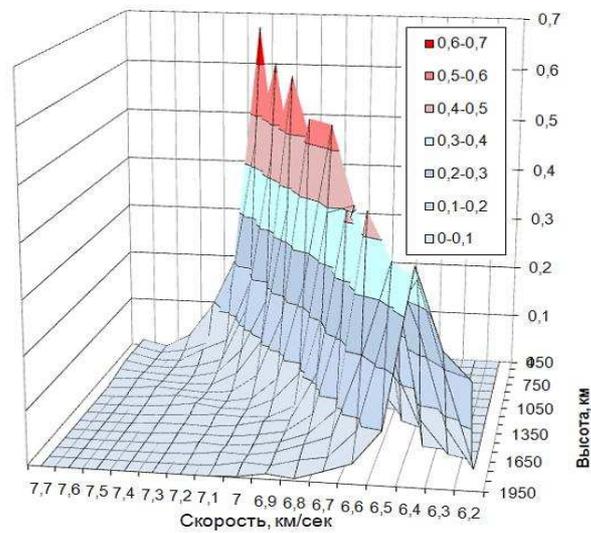


Рисунок 4.1.7 - Распределение тангенциальной скорости

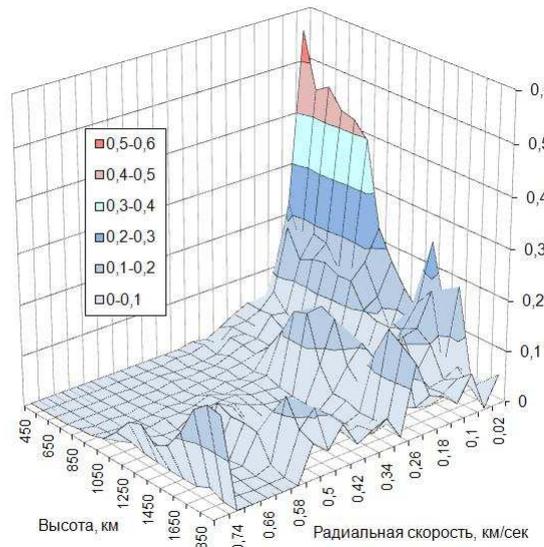


Рисунок 4.1.8 - Распределение радиальной скорости

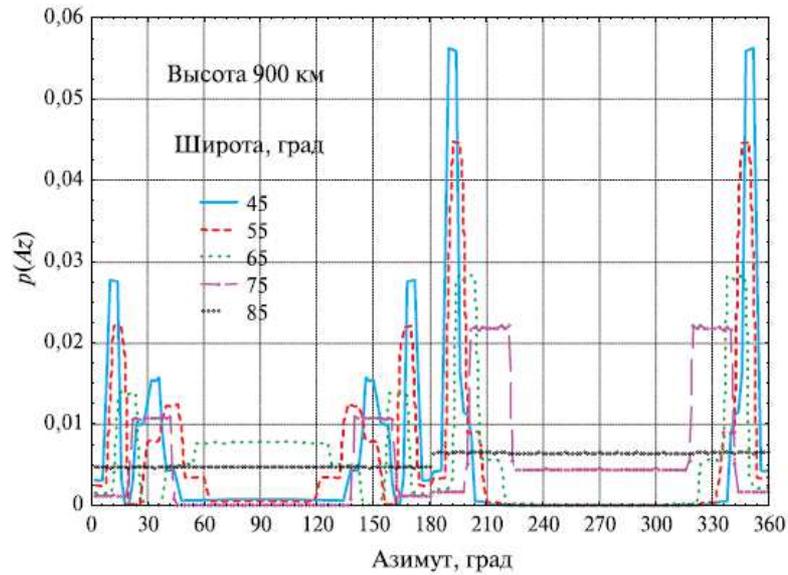


Рисунок 4.1.9 – Пример азимутального распределения для высоты 900 км

Из исходных данных были выбраны объекты с идентификационными номерами 1,2, и 3, которые удовлетворяют условиям активного удаления согласно сценарию исследования для формирования подмножества *ADR*. Для данных объектов была сформирована матрица с их параметрами для учета активного удаления и прогнозирования орбитальной эволюции. На рисунке 4.1.10 каждая точка характеризует один объект, в осях эксцентриситет, наклонение высота перигея.

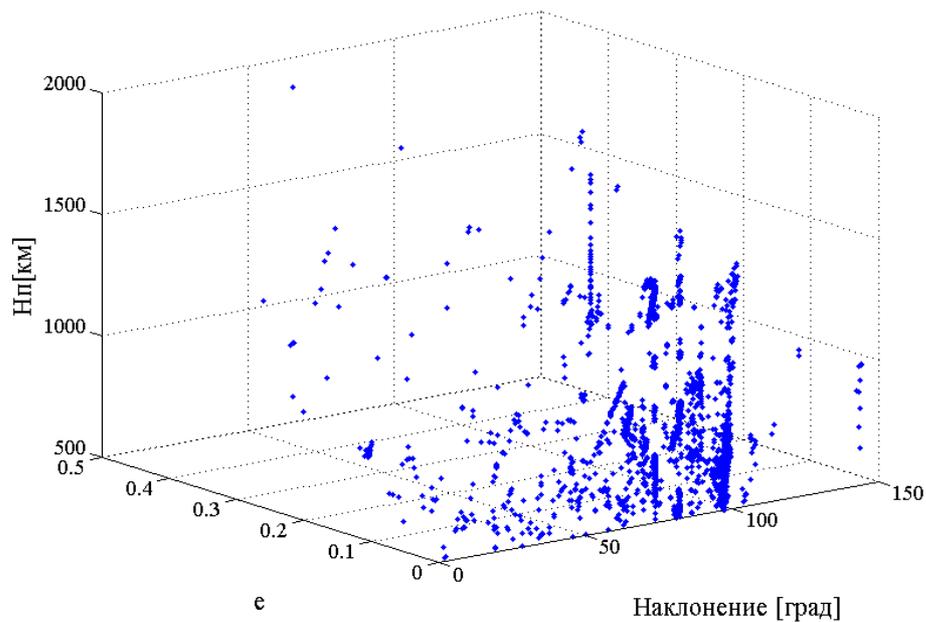


Рисунок 4.1.10 – Объекты, удовлетворяющие требованиям активного удаления по сценарию исследования

Как видно из графика 4.1.10, большая часть объектов для удаления располагается на орбитах с малыми значениями эксцентриситетов.

Для формирования подмножества *NEW* вновь запускаемых объектов была сформирована матрица с их параметрами для учета правила 25 лет. На рисунке 4.1.11 представлен график, аналогичный 4.1.10 для объектов подмножества *NEW*.

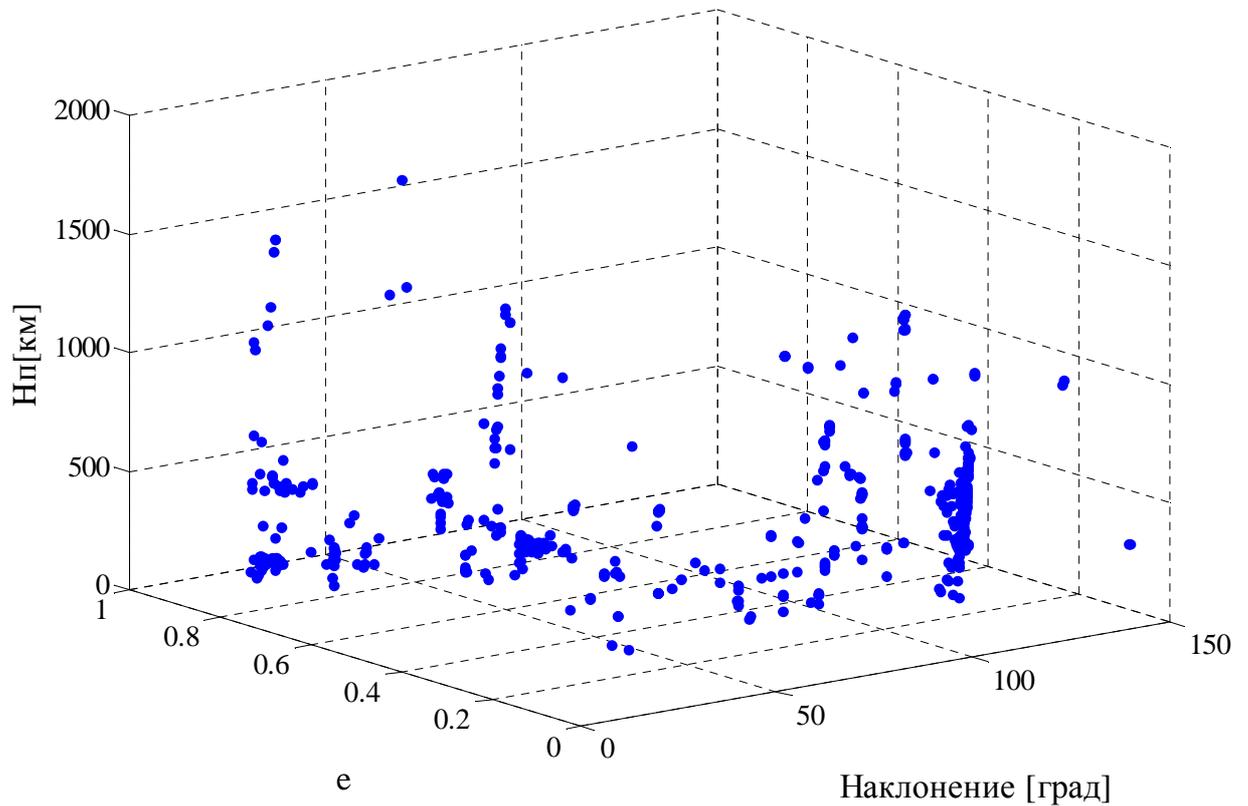


Рисунок 4.1.11 – Запускаемые объекты по исходным данным ЕКА

Как видно из графика 4.1.11, объекты распределены по исследуемым параметрам в некоторой закономерности, при этом большая их часть располагается на околокруговых орбитах.

## **4.2 Результаты оценки долговременной эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора**

В разделе представлены результаты оценки эволюции техногенного засорения по сценариям и исходным данным, представленным в разделе 4.1. В качестве результатов моделирования, согласно мировой практике решения данной задачи, выступают: зависимость количества объектов размером более 10 см по годам на интервале прогнозирования с разбиением его по типам объектов (все, текущий КМ, РБ+РН+ОЭ, новый КМ) и оценкой среднеквадратического отклонения (СКО) суммарного количества объектов, оценка концентрации КМ по высоте для разных моментов времени, оценка суммарного количества взаимных столкновений произошедших к заданному году, оценка районов взаимных столкновений, оценка областей увода КМ из НОО.

Рассмотрим результаты оценки для наилучшего и наихудшего сценариев. Под наихудшим сценарием понимается сценарий без активного удаления, с соблюдением рекомендаций по ограничению техногенного засорения (PMD) на 30%. На рисунках 4.2.1-4.2.4 представлены зависимости количества объектов разного типа по годам, зависимость концентрации и оценка количества столкновений.

Из графика на рисунке 4.2.1 можно сделать следующие выводы: в краткосрочной перспективе количество объектов будет оставаться примерно на постоянном уровне, что связано со сгоранием старых объектов КМ и слабой интенсивностью образования новых объектов вследствие столкновений. В среднесрочной перспективе количество объектов будет монотонно увеличиваться, а в долгосрочной перспективе наблюдается ярко выраженное увеличение количества нового КМ, вызванного столкновениями. Количество КА+РБ+ОЭ увеличивается на протяжении всего интервала прогноза. Серой пунктирной линией на графике представлена оценка СКО, полученная на основе оценки СКО количества образующихся в результате столкновений объектов.

Короткопериодические изменения связаны с 11-летним циклом солнечной активности.

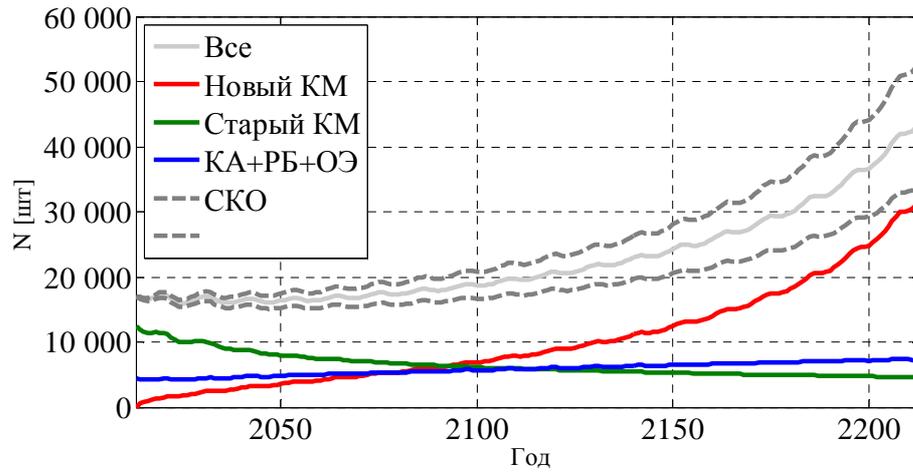


Рисунок 4.2.1 – Результаты оценки эволюции техногенного засорения НОО по годам при наихудшем сценарии

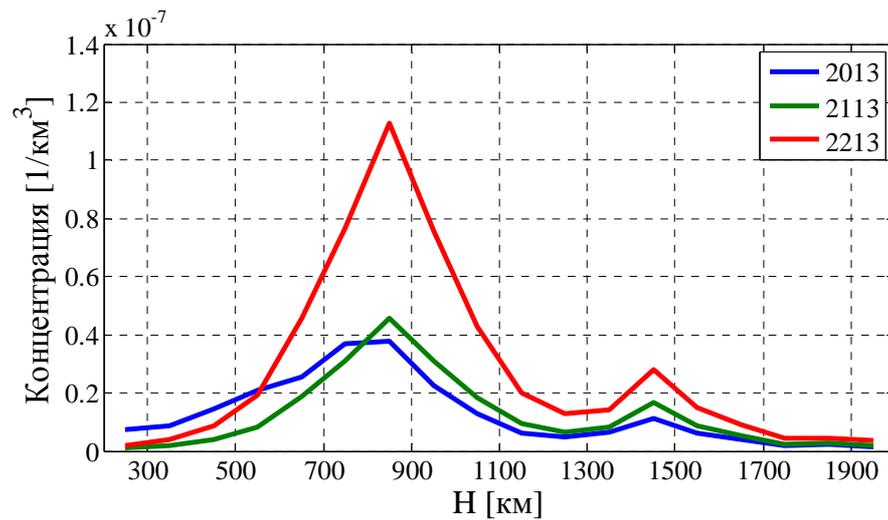


Рисунок 4.2.2 – Зависимость концентрации от высоты при наихудшем сценарии

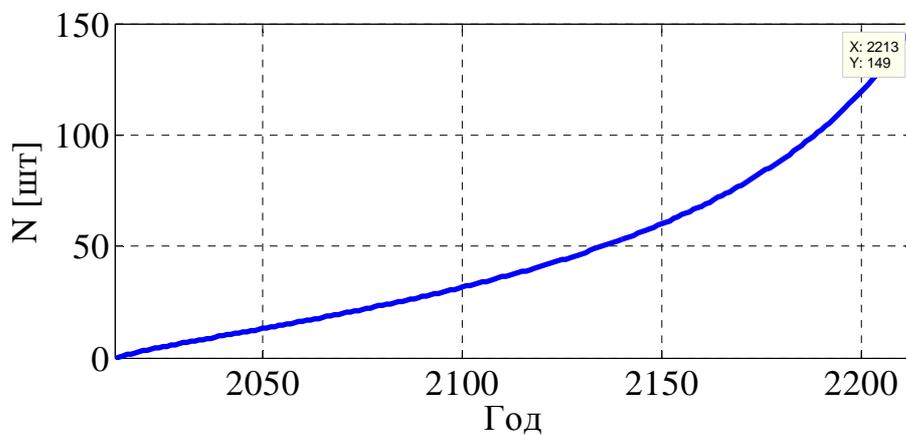


Рисунок 4.2.3 – Суммарное количество столкновений, произошедших к заданному году, при наихудшем сценарии

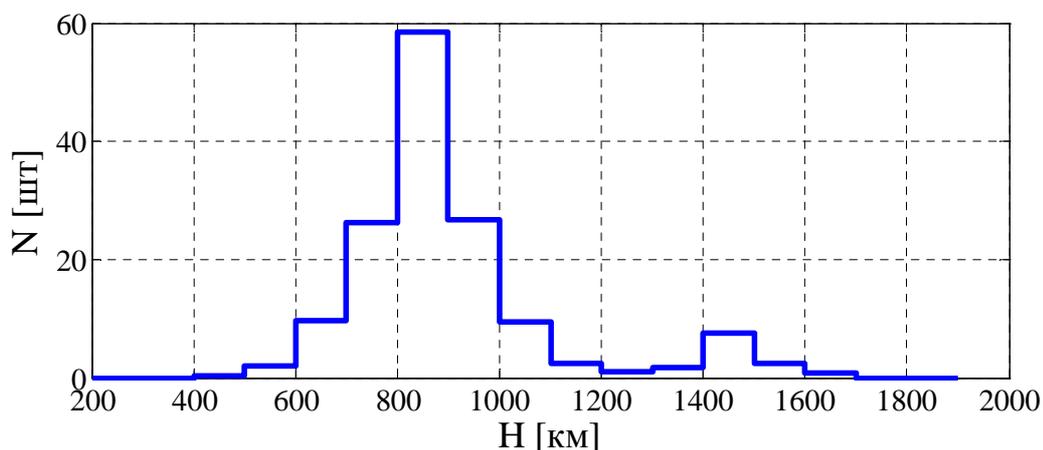


Рисунок 4.2.4 – Суммарное количество столкновений, произошедших в заданном диапазоне высот, при наихудшем сценарии

На графике 4.2.2 представлена зависимость концентрации в 2013, 2113 и 2213 гг. Из данного графика следует, что в первое столетие количество объектов в области высот до 700 км уменьшится, а для области высот более 700 км увеличится, с учетом оценки СКО можно сделать вывод, что количество объектов через 100 лет будет не меньше чем в настоящее время. На интервале 2113-2213 г произойдет резкое увеличение количества космических объектов, на конец прогноза оцененное среднее максимальное значение концентрации в 2.5 раза больше текущего уровня.

На графике 4.2.3 представлена зависимость изменения суммарного количества столкновений, произошедших к данному году. Из данного графика видно, что до 2125 г. количество столкновений увеличивается линейно, а после идет увеличение количества столкновений по степенному закону.

На графике 4.2.4 представлено распределение количества столкновений по высоте. Как видно из этого графика, наибольшее количество столкновений произойдет в диапазоне высот 700-900 км. Второй локальный максимум располагается в области 1400-1500 км.

На основании полученных результатов для наихудшего сценария можно сделать следующий вывод: в долгосрочной перспективе, при сохранении интенсивности запусков на уровне 2005-2012 гг. и соблюдения правила 25 лет для 30% запускаемых объектов, произойдет существенное увеличение засоренности

области НОО объектами с размером более 10 см вследствие большого количества столкновений.

Рассмотрим наилучший сценарий, учитывающий удаление 8 крупных объектов в год с 2025 г. по заданному критерию (произведение массы на вероятность столкновения) и соблюдение рекомендаций по ограничению техногенного засорения (PMD) на 90%. Результаты прогноза представлены на рисунках 4.2.6-4.2.9.

Из графиков на рисунках видно, что при данном сценарии наблюдается снижение и стабилизации количества объектов при прогнозе. Интенсивность образования нового КМ вследствие столкновений невысокая, концентрация объектов по сравнению с 2013 г. уменьшится и стабилизируется, слабая интенсивность взаимных столкновений и их практически линейное увеличение.

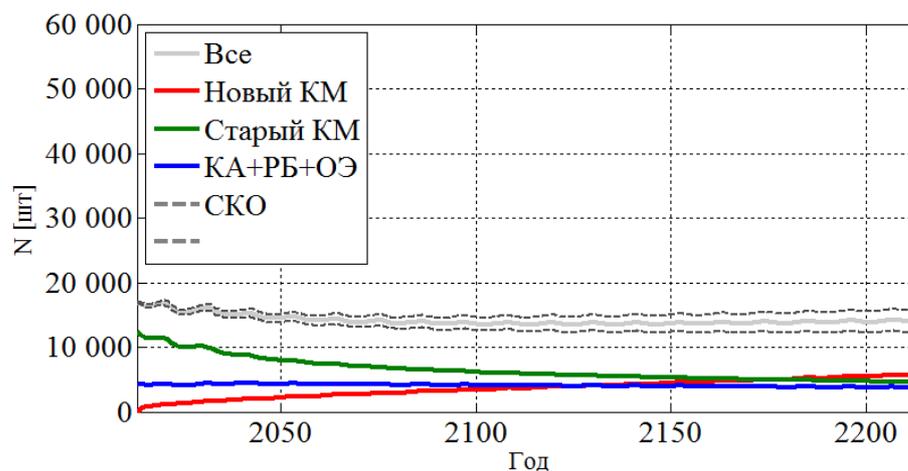


Рисунок 4.2.6 – Результаты оценки эволюции техногенного засорения НОО по годам в наилучшем сценарии

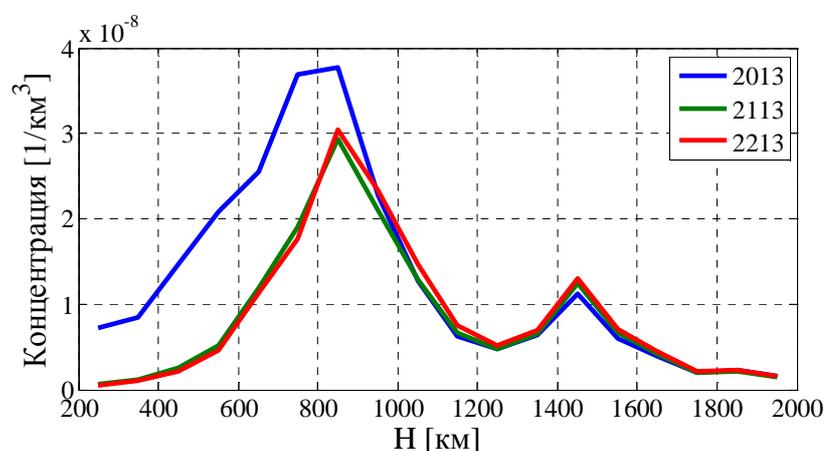


Рисунок 4.2.7 – Зависимость концентрации от высоты при наихудшем сценарии

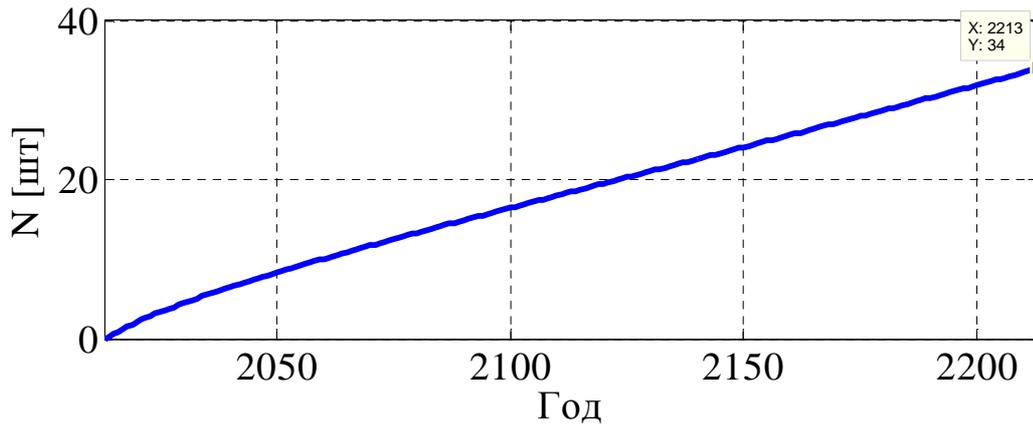


Рисунок 4.2.8 – Суммарное количество столкновений, произошедших к заданному году, при наилучшем сценарии

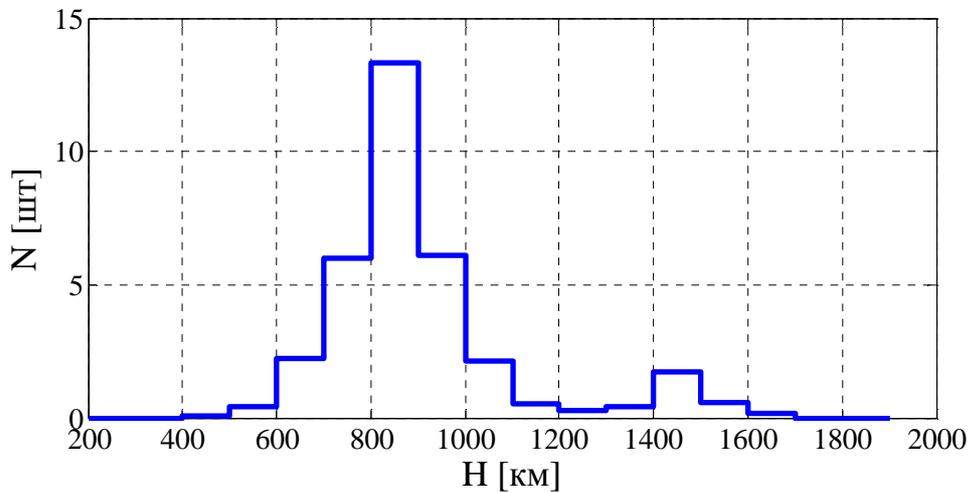


Рисунок 4.2.9 – Суммарное количество столкновений, произошедших в заданном диапазоне высот, при наилучшем сценарии

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

данных областей были построены распределения по высоте перигея и наклонению.

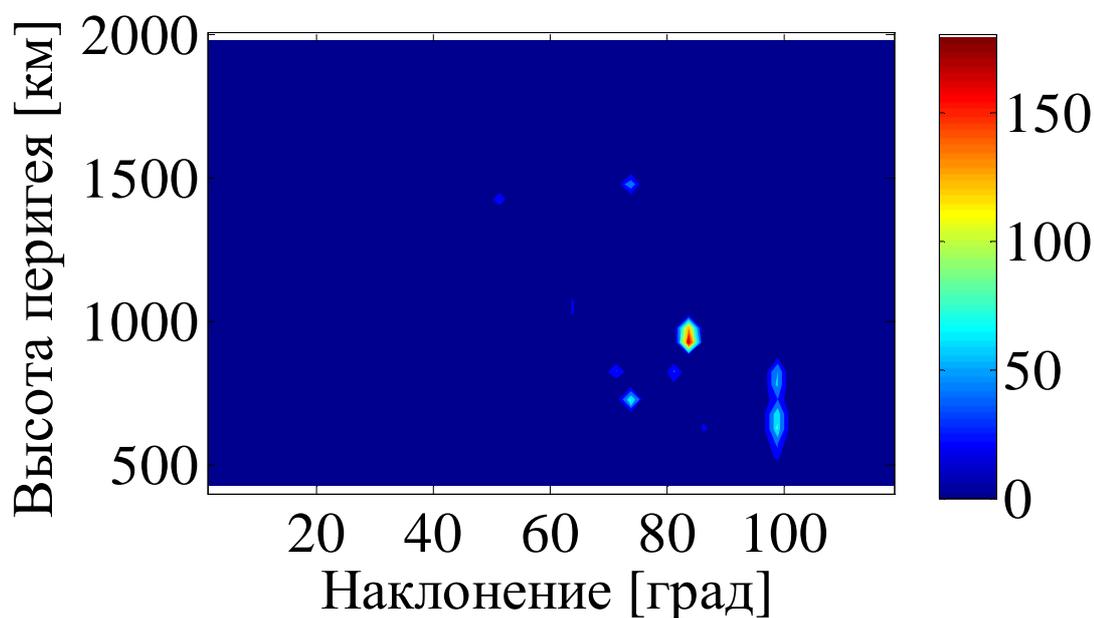
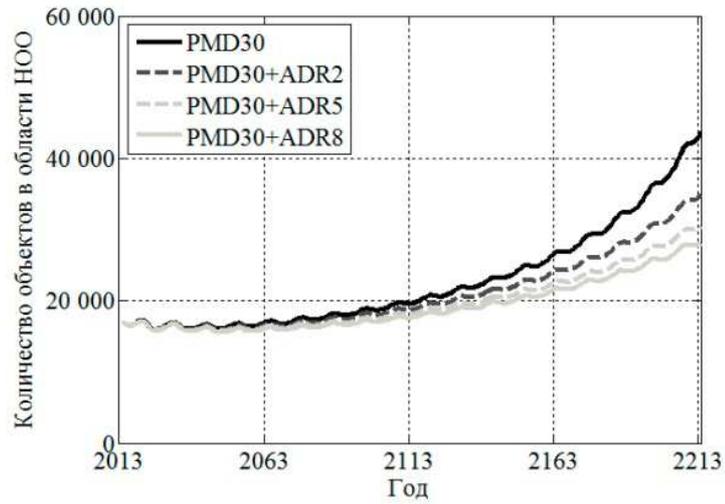


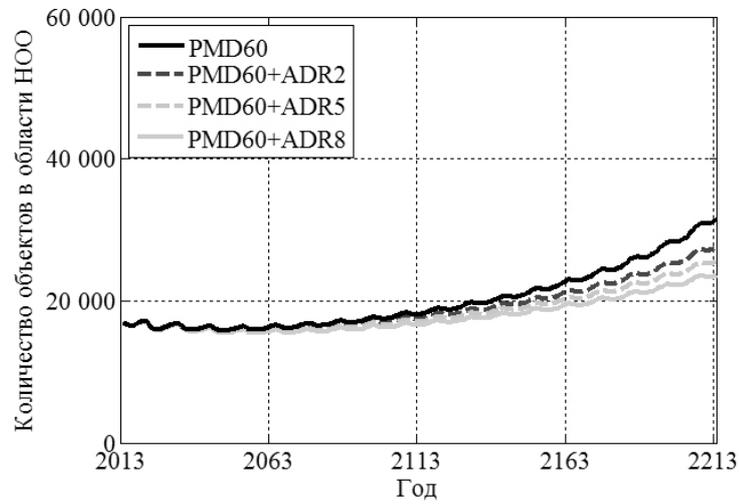
Рисунок 4.2.10 – Зависимость количества удаляемых объектов от высоты и наклонения для заданного сценария

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

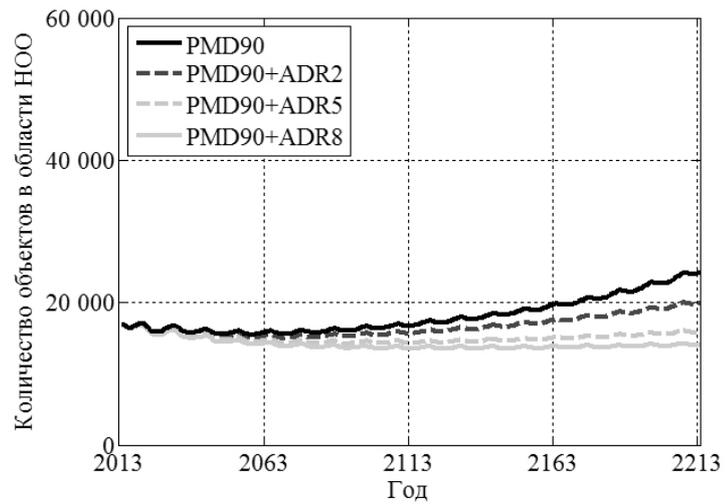
Рассмотрим совместно результаты прогноза по 12 сценариям. На рисунках 4.2.12 – 4.2.14 представлены зависимости количества объектов, количества столкновений и концентрации для всех сценариев.



(а)

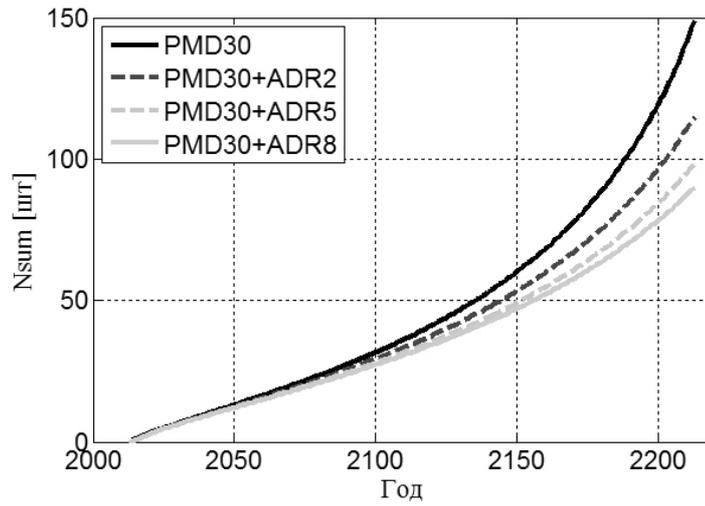


(б)

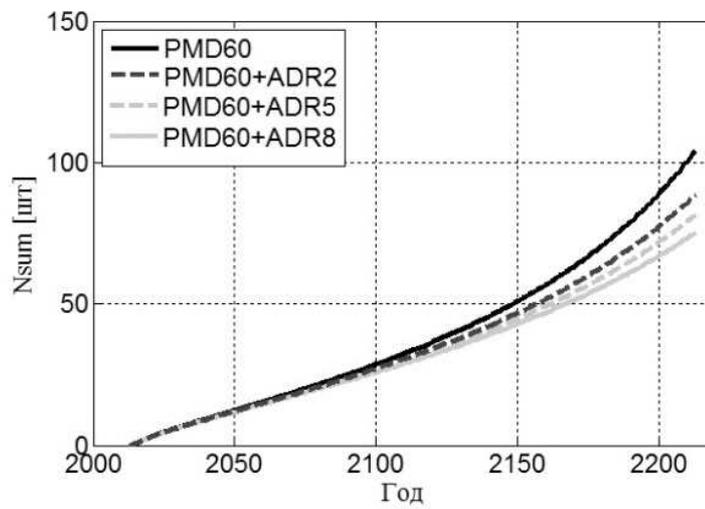


(в)

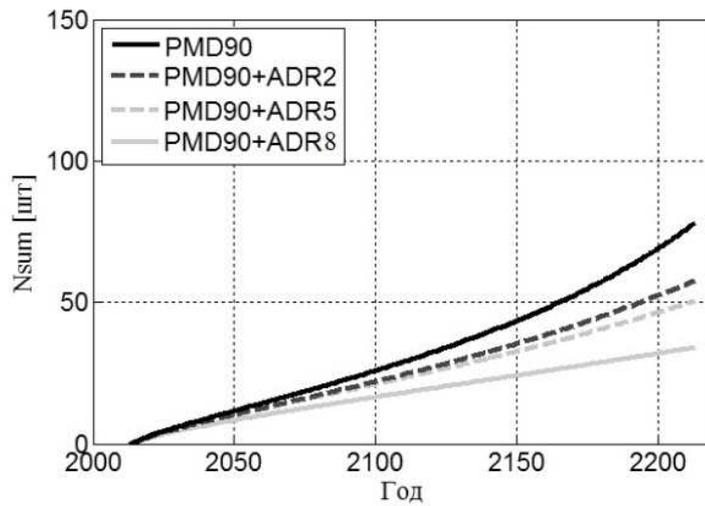
Рисунок 4.2.12 - Результаты оценки эволюции техногенного засорения области НОО по годам для 12 сценариев



(a)



(б)



(в)

Рисунок 4.2.13 – Суммарное количество столкновений, произошедших к заданному году, для 12 сценариев

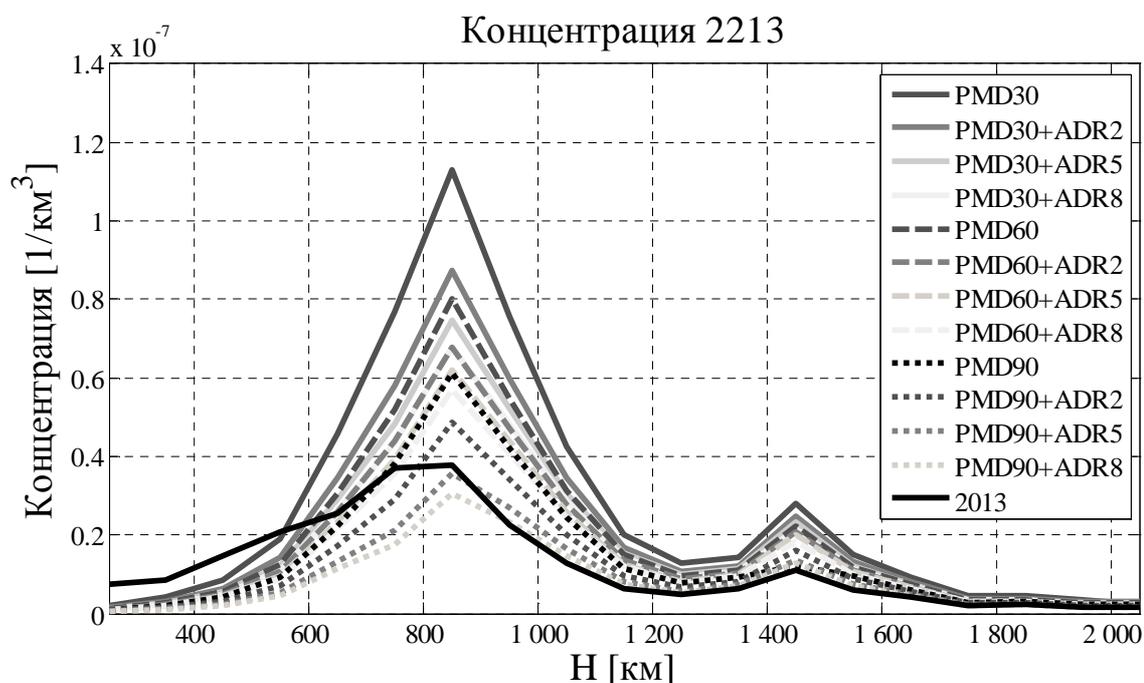


Рисунок 4.2.14 – Зависимость концентрации от высоты в 2213 г для исследуемых сценариев

Как видно из графиков на рисунках 4.2.12-4.2.14 изменение количества объектов и количества столкновений в долгосрочной перспективе существенно зависит от принимаемых мер по ограничению техногенного засорения и количества удаляемых объектов.

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

Как было показано ранее, в настоящее время наблюдается уровень соблюдения "правила 25 лет" около 60%. Если данный показатель не будет иметь тенденцию к увеличению, то техногенное засорение низких околоземных орбит будет продолжать увеличиваться.

### 4.3 Рекомендации по областям для активного удаления космического мусора

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

На рисунках в таблице 4.3.1 представлены зависимости количества удаляемых объектов от высоты перигея и наклона для всех сценариев. На рисунках в таблице 4.3.2 представлены зависимости суммарной массы удаляемых объектов от высоты перигея и наклона для всех сценариев. Из анализа данных таблиц можно сделать вывод, что по мере увеличения соблюдения правила 25 лет активное удаление смещается в область объектов с большими высотами. В наилучших сценариях появляются доля объектов с высотами перигея около 1500 км.

На рисунке 4.3.1 представлено распределение доли удаляемых объектов по высоте перигея и наклону, полученное путем усреднения всех результатов моделирования. Из данного графика наиболее темные области являются приоритетными для активного удаления.

Таблица 4.3.1 – Зависимости количества удаляемых объектов от высоты перигея и наклона

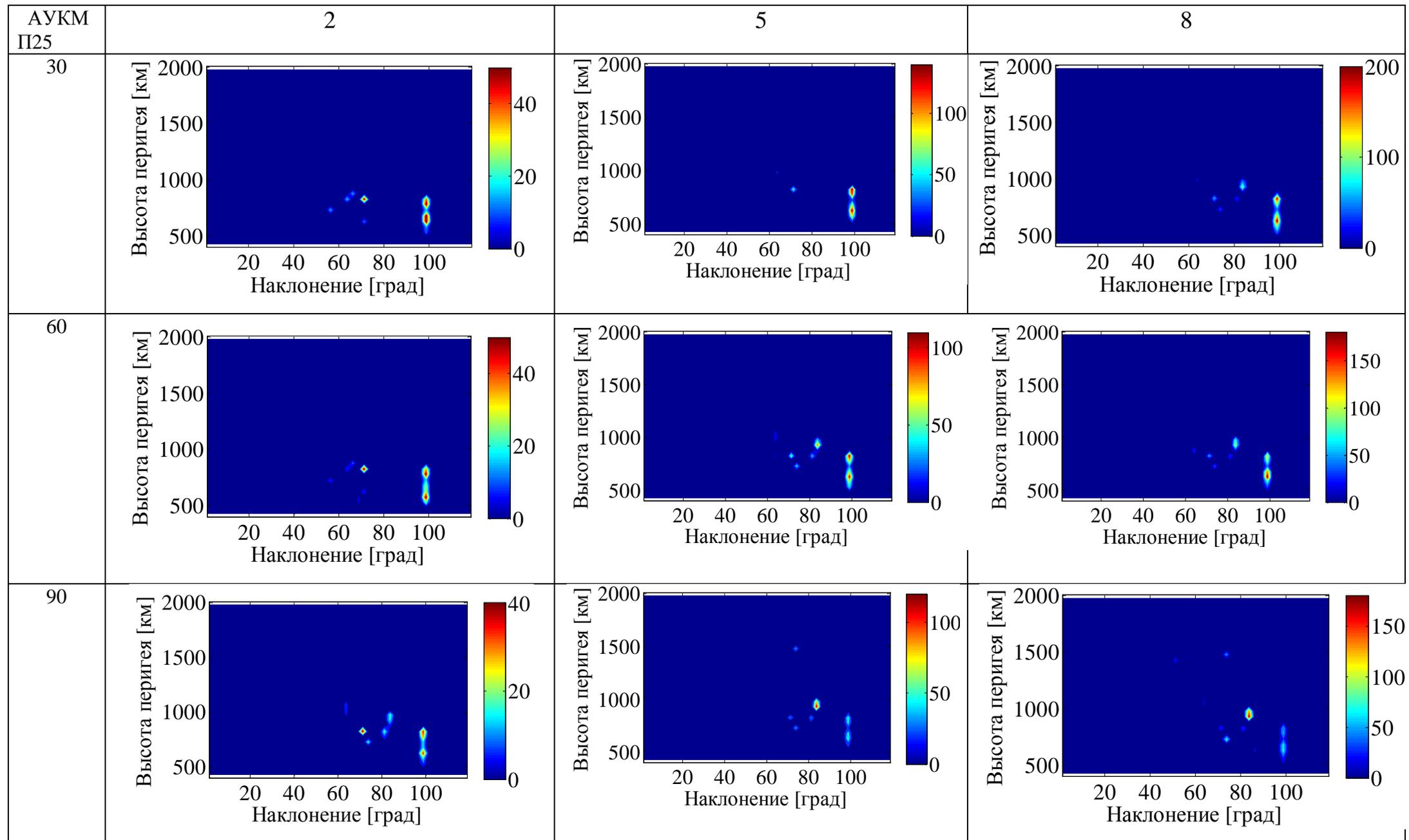
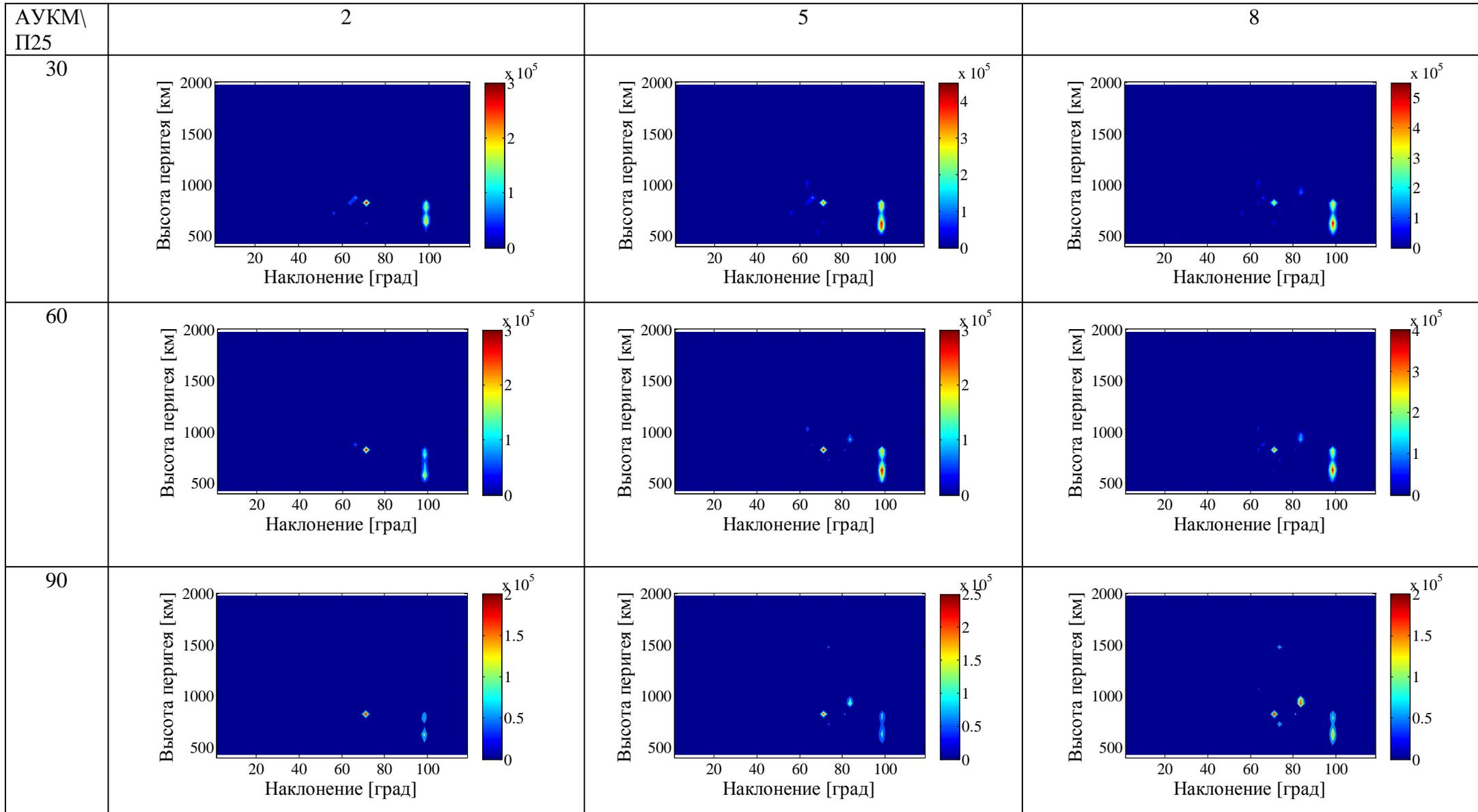


Таблица 4.3.2 – Зависимости массы удаляемых объектов от высоты перигея и наклоения



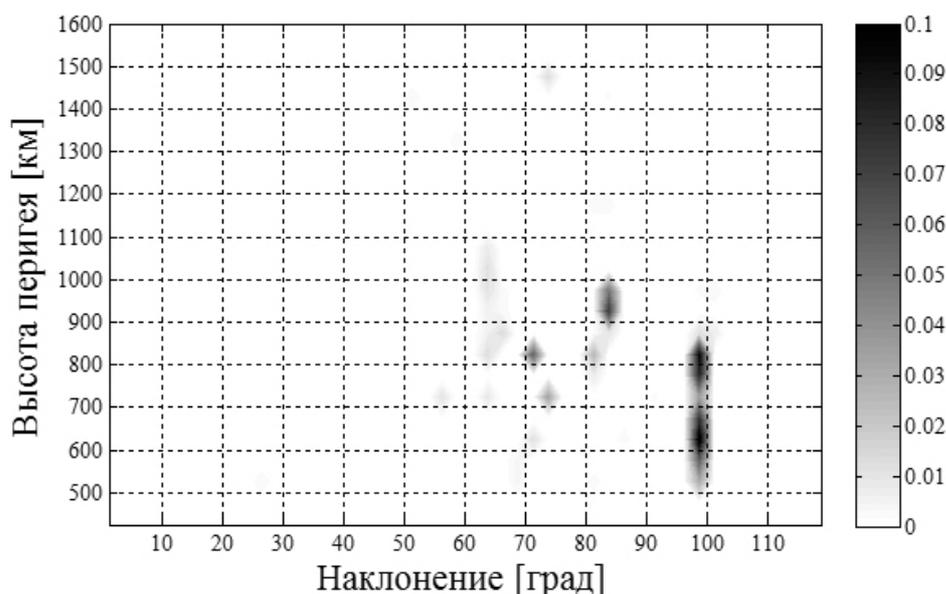


Рисунок 4.3.1 – Нормированная зависимость доли удаленных на интервале прогноза объектов от высоты перигея и наклоения по сценариям с активным удалением

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

- 1)  $h = 800-850$  км  $i = 71,25^{\circ}$ ;
- 2)  $h = 650-800$  км  $i = 98,75^{\circ}$ ;
- 3)  $h = 900-950$  км  $i = 83,75^{\circ}$ .

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

#### 4.4 Сравнительный анализ полученных результатов

Далее рассмотрим результаты сравнения применения разработанной методики и программного обеспечения с зарубежными аналогами с целью валидации разработанной методики и программно-математического обеспечения.

Рассмотрим сценарий с наилучшим выполнением мер по ограничению техногенного засорения. На рисунке 4.4.1 представлены оценки количества объектов, полученные с использованием разработанного программного комплекса и по оценкам NASA.

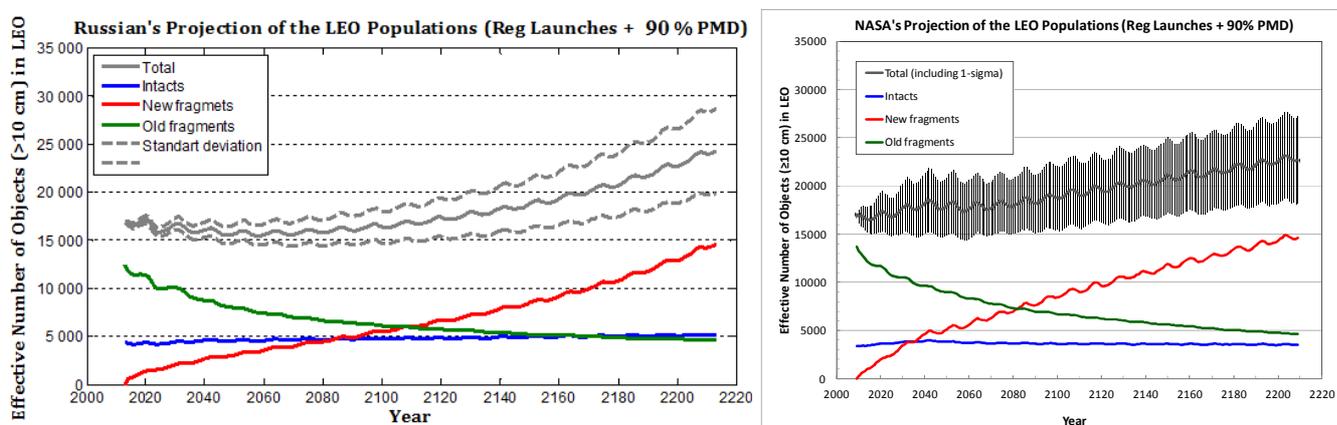


Рисунок 4.4.1 – Сравнение результатов моделирования с оценками NASA

Как видно из сравнения результатов с данными NASA наблюдается хорошее соответствие. Некоторое отличие результатов может быть вызвано использованием при оценках NASA более ранних данных о популяции космических объектов в области НОО. Результаты на рисунке 4.4.1 показывают, что в случае соблюдения мер по ограничению техногенного засорения оно будет продолжать увеличиваться.

Рассмотрим сценарии с наилучшими показателями соблюдения мер по ограничению техногенного засорения и с различным количеством уводимых объектов. На рисунке 4.4.2 представлены результаты оценки, полученные с использованием разработанной методики и специалистами Космического агентства Соединенного Королевства (UKSA).

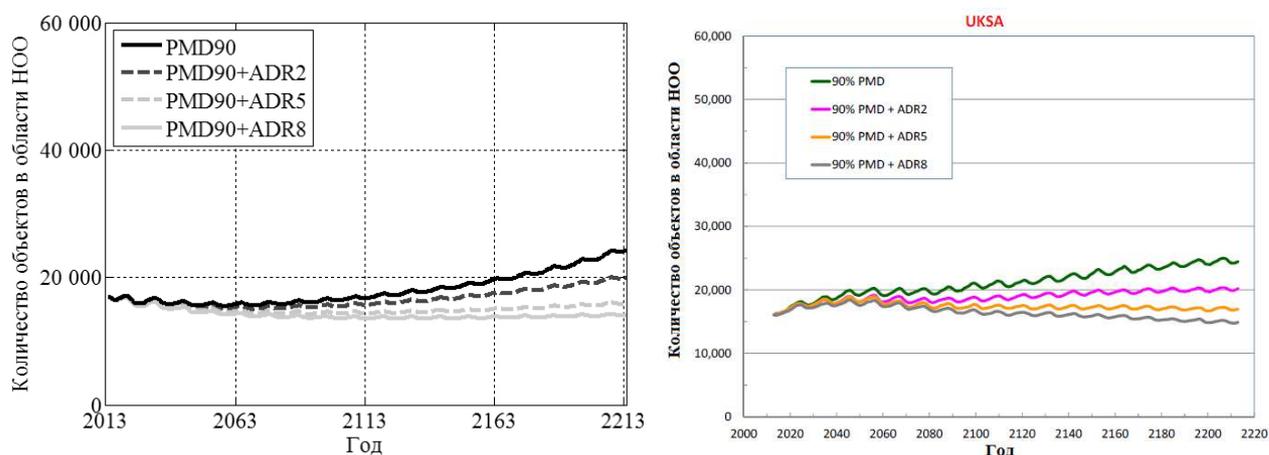


Рисунок 4.4.2 - Сравнение результатов прогноза с результатами, полученными Космическим агентством Соединенного Королевства

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

Рассмотрим сравнение полученных результатов по всем сценариям моделирования, с результатами полученными по модели SDPA на рисунке 4.4.3. Расчеты по модели SDPA проведены для двух граничных сценариев: с запусками на прежнем уровне и без запусков.

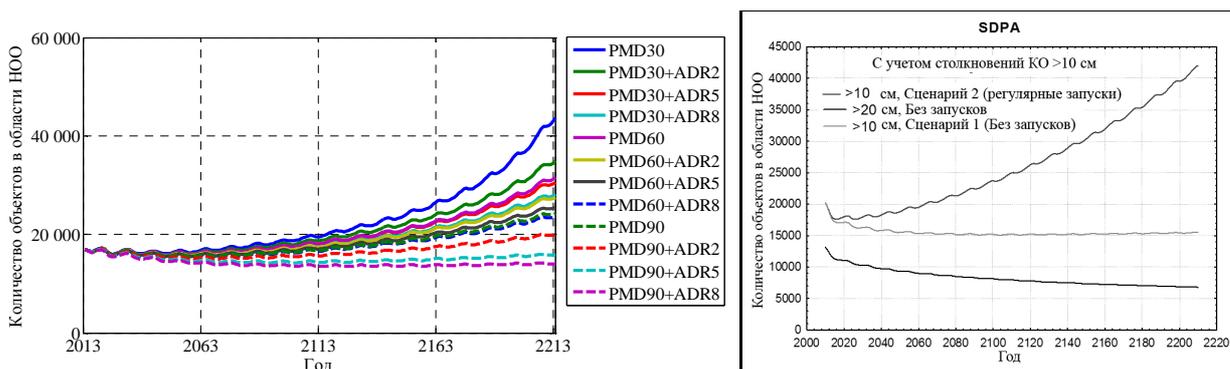


Рисунок 4.4.3 - Сравнение результатов прогноза с результатами, полученными по модели SDPA

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

На рисунке 4.4.4 представлены графики областей по высоте и наклонению в которых наиболее актуально активное удаление, полученные по результатам исследования и специалистами NASA на основании обработки имеющейся информации [25]. Данные результаты получены с использованием критерия произведения массы на вероятность столкновения. Как видно из рисунка 4.4.4 полученные результаты соответствуют исследованиям NASA.

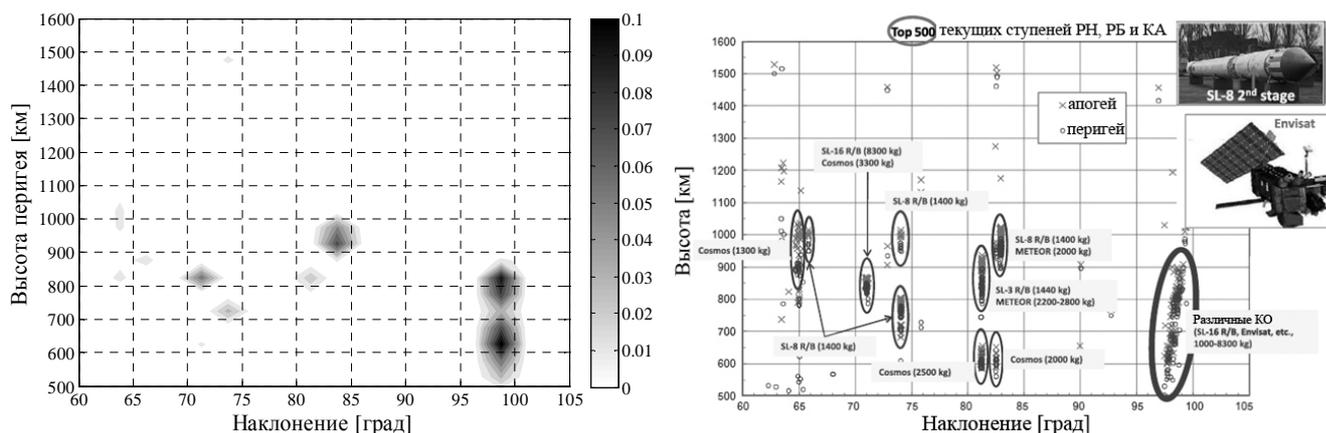


Рисунок 4.4.4 – Результаты анализа 500 объектов с наибольшим произведением значений массы на вероятность столкновения

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

#### 4.5 Выводы по главе 4

1. Проведена оценка эволюции техногенного засорения области низких околоземных орбит при реализации активного удаления космического мусора для 12 сценариев по исходным данным, разработанным Межагентским координационным комитетом по космическому мусору.

2. Результаты оценки показали, что долгосрочная эволюция техногенного засорения области низких околоземных орбит объектами размером более 10 см существенно зависит от принимаемых мер по ограничению и снижению техногенного засорения, в частности от активного удаления космического мусора.

3. Выполнение мер ограничения техногенного засорения не позволит его стабилизировать в долгосрочной перспективе.

4. Показано, что для стабилизации техногенного засорения необходимо проводить активное удаление 2 объектов в год, а для снижения техногенного засорения необходимо удалять более 5 объектов в год.

5. Выявлены области, в которых необходимо проведение операции активного удаления в первую очередь:

- $h = 800-850$  км  $i = 71,25$ ;
- $h = 650-800$  км  $i = 98,75$ ;
- $h = 900-950$  км  $i = 83,75$  .

6. Проведено сравнение результатов с зарубежными аналогами, сравнение показало хорошее соответствие полученных результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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,  $i = 71,25^\circ$ ;
- 2)  $h_n = 650-800$  км,  $i = 98,75^\circ$ ;
- 3)  $h_n = 900-950$  км,  $i = 83,75^\circ$ .

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ГСО	– геостационарная орбита
ЕКА	– Европейское Космическое Агентство
КА	– космический аппарат
КО	– космический объект
КМ	– космический мусор
МККМ	– Межагентский координационный комитет по космическому мусору
НОО	– низкая околоземная орбита
ОКП	– околоземное космическое пространство
ООН	– Организация Объединенных Наций
ООП	– объектно-ориентированное программирование
ОЭ	– операционные элементы
РБ	– разгонный блок
РН	– ракета-носитель
СВО	– средневысокая орбита
СКА	– сервисный космический аппарат
СКО	– среднеквадратическое отклонение

**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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 248 с.
2. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 188 с.
3. IADC Space Debris Mitigation Guidelines [Электронный ресурс] / Inter-agency space debris coordination committee – Режим доступа: [http://www.iadc-online.org/index.cgi?item=docs\\_pub](http://www.iadc-online.org/index.cgi?item=docs_pub) (дата обращения: 24.05.2015).
4. Руководящие принципы Комитета ООН по космосу по предупреждению образования космического мусора. – Резолюция 62-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН, A/RES/62/217 от 10.01.2008.
5. ГОСТ Р 52925-2008. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008.
6. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of Debris Belt // Journal of geophysical research. –1978. – V. 83, A6. – P. 2637-2646.
7. Kessler D.J. Collisional cascading the limits of population growth in low Earth orbit // Advances in Space Research. – 1991. – V.11, № 12. – P. 63-66.
8. Назаренко А.И. Прогноз на 200 лет, синдром Кесслера [Электронный ресурс] / – Режим доступа: <http://satmotion.ru/engine/documents/document85.pdf> (дата обращения: 24.05.2015).
9. Nazarenko A.I. Space debris status for 200 years ahead & the Kessler effect // 29-th IADC Meeting. – Berlin, Germany, 2011.
10. IADC Report AI 27.1. Stability of the Future LEO Environment [Электронный ресурс] / Inter-agency space debris coordination committee – Режим

доступа: <http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-2012-08,%20Rev%201,%20Stability%20of%20Future%20LEO%20Environment.pdf> (дата обращения: 4.05.2015).

11. Liou J.-C., Hall D.T., Krisko P.H., Opiela J.N. LEGEND - a three-dimensional LEO-to-GEO debris evolutionary model // *Advances in Space Research.* – 2004. – V. 34, №5. – P.981-986.

12. Klinkrad H. *Space Debris Models and Risk Analysis* // – Chichester, UK: Praxis Publishing, 2006. – P.430.

13. Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. – М.:ИКИ РАН, 2013. – 216 с.

14. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. – М.:ИКИ РАН, 2012. – 192 с.

15. Технический доклад о космическом мусоре [Электронный ресурс]/ UN – Режим доступа: <http://www.iadc-online.org/index.cgi?item=documents> (дата обращения: 24.05.2015).

16. Orbital debris quarterly news [Электронный ресурс] / – V.18, Issue 3. – Режим доступа: <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/newsletter.html> (дата обращения: 24.05.2015).

17. Handbook for limiting orbital debris [Электронный ресурс] / – NASA,2008. – Режим доступа: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/NHBK871914.pdf> (дата обращения: 24.05.2015).

18. History of on-orbit satellite fragmentations 14<sup>th</sup> edition [Электронный ресурс] / NASA,2008. – Режим доступа: <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/SatelliteFragHistory/TM-2008-214779.pdf> (дата обращения: 24.05.2015).

19. Старков А.В. Синтез алгоритмов управления космическими аппаратами с учетом требований безопасности проведения динамических операций.: дис. к.т.н. по спец. 05.07.09: защищена 12.10.2012 в Московском авиационном институте (национальный исследовательский университет).

20. Смирнов Н.Н. Эволюция «Космического мусора» в околоземном космическом пространстве // *Успехи механики* – 2002. –Т.1, №2. – С. 13-104.

21. Лебедев А.А. Введение в анализ и синтез систем: учебное пособие – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 351 с.
22. Lemmens S., Flohrer T. Review of global achievements in clearing LEO and GEO protected zones / 33rd IADC Meeting. – Houston, USA, 2015.
23. Juan Carlos Dolado Perez. Analysis of mitigation guidelines compliance at international level in low Earth orbit // 65th International Astronautical Congress. – 2014. IAC-14,A6,4,4,x21608.
24. Liou J.-C. An active debris removal parametric study for LEO environment remediation // Progress in Propulsion Physics – 2013. – V.4. – P.735-748.
25. J.-C. Liou, Nicholas L. Johnson. A sensitivity study of the effectiveness of active debris removal in LEO // Advances in Space Research. – 2011, – № 47. – P. 1865-1876.
26. Phipps C.R. ORION: Clearing near-Earth space debris using a 20-kW, 530 nm, Earth-based, repetitively pulsed laser // Laser and Particle Beams. – 1996. – V. 14, No. 1. – P. 1-44.
27. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – 2-е изд. – М.: Эдиториал УРСС, 2011. - С. 544.
28. Назаренко А.И., Скребушевский Б.В. Эволюция и устойчивость спутниковых систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 284 с.
29. ГОСТ Р 25645.166-2004 Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли. – Введ. 2005-01-01. – М.: ИПК издательство стандартов, 2004 г.
30. ГОСТ 25645.302-83 Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности. – Введ. 1985-01-01. - М.: ИПК издательство стандартов, 1983 г.
31. Space Debris. Hazard Evaluation and Mitigation. / Edited by Nickolay N. Smirnov. – Taylor & Francis Inc., 2001. – P. 248.
32. Nazarenko A.I. The Development of the Statistical Theory of a Satellite Ensemble Motion and its Application to Space Debris Modeling // Proceedings of the Second European Conference on Space Debris. – ESOC, Darmstadt, Germany, 1997.

33. Nazarenko A.I., Smirnov N.N., Kiselev A.B. The Space Debris Evolution Modeling Taking Into Account Satellite's Collisions // Proceedings of the US/European Celestial Mechanics Workshop. – Poznan, Poland, 2000.

34. Назаренко А.И. Построение высотно-широтного распределения объектов в околоземном космическом пространстве // Проблема загрязнения космоса (космический мусор). – М.:Космосинформ, 1993.

35. Смирнов Н.Н., Киселев А.Б., Назаренко А.И. Математическое моделирование эволюции космического мусора на низких околоземных орбитах / Вестник Моск. Ун-та. Мат., Мех., – 2002. – № 4.

36. Action Item 31.5 Benefits of active debris removal in LEO in light of the investigation of uncertainties contributing to long-term environment modeling zones / 34nd IADC Meeting. – Beijing, China, 2014.