

УДК 629.783
На правах рукописи

БЕЛЯЕВ АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОКОЛОЗЕМНОГО
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Специальность 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Корянов Всеволод Владимирович**,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Динамика и управление полетом
ракет и космических аппаратов» МГТУ им.
Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Старков Александр Владимирович**,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Системный анализ и
управление» ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)»

Улыбышев Сергей Юрьевич,
доктор технических наук,
руководитель проектов по научной работе
конструкторского бюро прикладной механики
ФГУП «Центральный научно-исследовательский
институт химии и механики»

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военное
образовательное учреждение высшего образования
«Военная академия Ракетных войск стратегического
назначения имени Петра Великого» Министерства
обороны Российской Федерации, г. Балашиха

Защита состоится «__» ____ 2025 г. в __ часов __ мин. на заседании
диссертационного совета 24.2.331.08 при Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва,
Госпитальный переулок, дом 10, корпус СМ, ауд. 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» ____ 2025 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью,
просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Учёному секретарю диссертационного совета
24.2.331.08.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.08
кандидат технических наук, доцент

Луценко А.Ю.

Актуальность темы диссертационной работы. Мониторинг околоземного космического пространства (ОКП) является неотъемлемой задачей в рамках его активной эксплуатации. Особое внимание здесь уделяется мониторингу техногенных космических объектов (ТКО) – всех объектов, источником образования которых является освоение человеком ОКП. К ТКО относят как активно функционирующие космические аппараты (КА), включая пилотируемые, так и неуправляемые объекты так называемого космического мусора (КМ).

Согласно современным данным анализа засорённости ОКП, на текущий момент насчитывается порядка 35 тыс. объектов с линейным размером более 10 см, порядка 100 тыс. объектов околосантиметрового диапазона и свыше 1 млн. объектов околомиллиметрового диапазона. При этом объекты КМ с линейным размером от 1 см и больше представляют реальную угрозу активно функционирующему КА при столкновении.

На сегодня известно большое количество как зарегистрированных, так и теоретически обоснованных случаев столкновения между ТКО в ОКП, что порождает новые объекты КМ. Большое количество КМ на орbitах также представляет угрозу людям, а именно, по данным Европейского космического агентства, до 10% всех маневров МКС связаны с уклонением от столкновений с фрагментами КМ.

Анализ распределения ТКО по орбитам показывает, что наиболее сложная обстановка в части рисков эксплуатации КА наблюдается в области низких околоземных орбит (ННО), где сосредоточено порядка 70% всех ТКО в ОКП.

Основная часть информации о засорённости ОКП поступает от наземных технических средств мониторинга, которые представлены в основном наземными оптическими станциями (телескопами) и наземными радиолокационными станциями (радарами). К ключевым недостаткам наземных оптических средств мониторинга относятся влияние территориального расположения на доступные для мониторинга области ОКП, зависимость от погодных условий и влияние атмосферных эффектов на точности измерений. Для радиолокационных станций это чувствительность системы, пропорциональная четвертой степени расстояния до цели, а также высокие экономические затраты на разработку и высокие энергетические затраты на эксплуатацию.

Сегодня растёт интерес к космическим средствам мониторинга ОКП ввиду относительно меньшей стоимости разработки, а также отсутствием ограничений и недостатков в части возможности мониторинга ОКП по сравнению с наземными техническими средствами мониторинга. Примером тому служат результаты проектов MSX, NeoSSat, Sapphire, SBSS, а также система NorthStar, в рамках которой предполагается развертывание спутниковой группировки из 12 КА для мониторинга ТКО в ОКП, первые 2 из которых были выведены в начале 2024 года. В качестве технических средств мониторинга в данных системах используются бортовые оптико-электронные средства (ОЭС).

Анализ исследований в части проектирования подобных космических систем показал отсутствие комплексного и систематического подхода к решению данной задачи. Поэтому ключевое внимание в работе уделяется вопросам определения параметров космических систем мониторинга в части баллистического построения, т.к. наряду с характеристиками технического средства мониторинга, это составляет

основу перспективной космической системы мониторинга ТКО в ОКП, которая должна обеспечивать ситуационную осведомлённость в части распределения ТКО в ОКП для безопасности космической деятельности.

Отдельно рассматривается задача предварительного определения орбит по измерениям, получаемых бортовыми техническими средствами мониторинга. Особенностью данной задачи в контексте настоящего диссертационного исследования заключается в невозможности использования классических и широко применяемых методов и подходов. Существующие теоретические работы, описывающие возможные решения данной задачи имеют достаточно общую направленность и не рассматриваются для конкретных космических систем мониторинга ТКО в ОКП. В связи с этим, в диссертационном исследовании делается акцент на возможности предварительного определения орбит ТКО в рамках перспективной космической системы.

На основе вышесказанного можно сказать о том, что диссертационное исследование, посвящённое разработке методики формирования баллистического построения космической системы мониторинга околоземного космического пространства, является *актуальной*.

Целью работы является повышение эффективности существующих систем по обеспечению ситуационной осведомленности в ОКП за счёт создания космических средств оптического мониторинга ТКО в ОКП.

Для достижения поставленной цели в работе решается следующая **научно-техническая задача**: разработать методику для формирования баллистического построения космической системы оптического мониторинга ТКО в ОКП на основе оценок показателей эффективности мониторинга.

Исходя из этого необходимо решить следующие частные **задачи**:

1. Определить показатели эффективности мониторинга ТКО в ОКП и разработать методику их оценки;

2. Разработать методику для определения баллистического построения и иных параметров космической системы, обеспечивающих эффективный мониторинг ТКО в ОКП;

3. Разработать методику оценки точности предварительного определения орбит по измерениям, получаемых ОЭС, установленными на борту КА мониторинга космической системы;

4. Применить разработанные методики для решения задачи определения баллистического построения космической системы мониторинга ТКО в ОКП в первом приближении.

Объектом исследования является группировка КА мониторинга ТКО в ОКП с применением бортовых ОЭС, определяющих космическую систему мониторинга, и процесс определения эффективного баллистического построения такой космической системы.

Предметом исследования являются методы, алгоритмы и методики для определения параметров баллистического построения группировки КА мониторинга ТКО в ОКП с применением бортовых ОЭС, а также методы предварительного определения орбит ТКО по измерениям, получаемых бортовыми ОЭС, установленных на КА мониторинга.

Подходы и методы решения задач, используемые в работе:

1. Определение параметров баллистического построения космической системы мониторинга происходит на основе моделирования движения КА аналитическими методами с учётом влияния полюсного сжатия Земли.

2. Решение задачи предварительного определения орбит происходит на основе прогнозирования орбиты методом численного интегрирования модели движения КА мониторинга и ТКО с учётом влияния полюсного сжатия Земли и сопротивления атмосферы Земли.

3. Предварительное определение орбит ТКО происходит нелинейным методом наименьших квадратов при использовании алгоритма минимизации Левенберга-Маркварда.

Научная новизна диссертационной работы заключается следующем:

1. Предложена и разработана методика для определения параметров баллистического построения космической системы мониторинга техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве;

2. Получены параметры баллистического построения космической системы, обеспечивающие эффективный мониторинг техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве;

3. Показаны особенности предварительного определения орбит техногенных космических объектов по измерениям, получаемых бортовыми оптико-электронными средствами, установленных на космическом аппарате мониторинга.

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны методики:

- Оценки показателей эффективности мониторинга ТКО в ОКП для космических средств;
- Определения параметров баллистического построения на основе оценок показателей эффективности мониторинга;

- Предварительного определения орбит ТКО по измерениям, получаемых бортовыми ОЭС, установленных на КА мониторинга.

2. Получены результаты оценок показателей эффективности мониторинга для различных вариантов баллистического построения космической системы.

3. Показаны закономерности, связанные с выбором ориентации ОЭС мониторинга, обеспечивающие эффективный мониторинга ТКО в ОКП.

4. Получены варианты баллистического построения космической системы, обеспечивающие эффективный мониторинга ТКО в ОКП.

5. Показана возможная достижимая точность предварительного определения параметров орбит ТКО по измерениям, получаемых бортовыми ОЭС, установленных на КА мониторинга.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработаны алгоритмы и программы, позволяющие проводить оценку показателей эффективности мониторинга для различных вариантов баллистического построения космических систем мониторинга ТКО в ОКП;

2. Разработан алгоритм и программа для предварительного определения параметров орбит ТКО по измерениям, получаемых бортовыми ОЭС, установленных на КА мониторинга с учётом особенностей решения задачи

предварительного определения орбиты применительно к космической системе мониторинга;

3. Разработанные методики и алгоритмы позволяют решать проектную задачу определения параметров баллистического построения космических систем мониторинга ОКП.

Достоверность полученных результатов и выводов, полученных в работе, подтверждается в рамках решения задачи предварительного определения орбит на этапе моделирования возможных измерений, а также непротиворечивостью в полученных результатах данным, опубликованных другими авторами в открытых научных работах.

Личный вклад автора заключается в разработке методик, алгоритмов и программно-алгоритмического комплекса на их основе для получения численных результатов, а также обработке, анализе, верификации и обобщении полученных результатов. Весь заимствованный материал отмечен в диссертационной работе ссылками. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично. Среди которых:

1. Оценены показатели эффективности мониторинга техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве для различных вариантов баллистического построения космической системы;

2. Определены параметры баллистического построения космической системы, обеспечивающие эффективный мониторинг техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве;

3. Оценена точность предварительного определения орбит по измерениям, получаемым космической системой.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методики оценок показателей эффективности мониторинга ТКО в ОКП космической системой.

2. Методика определения параметров баллистического построения космической системы мониторинга ТКО в ОКП на основе оценок показателей эффективности.

3. Методика предварительного определения орбит ТКО по измерениям, получаемых бортовыми ОЭС, установленных на КА мониторинга на основе решения данной задачи нелинейным методом наименьших квадратов при использовании алгоритма минимизации Левенберга-Маркгварда.

4. Результаты определения параметров баллистического построения, обеспечивающих эффективный мониторинг ТКО в ОКП.

5. Результаты оценок показателей эффективности мониторинга ТКО в ОКП для различных вариантов баллистического построения космической системы.

6. Результаты предварительного определения орбит ТКО по измерениям, получаемых бортовыми ОЭС, установленных на КА мониторинга.

Апробация работы

1. XLVII - XLIX Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства (г. Москва, 2023-2025).

2. 57 и 58-е Научные Чтения памяти К.Э. Циолковского (2022, 2023, г. Калуга).

3. XV, XVII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2022, 2024).

4. 45th Scientific Assembly COSPAR 2024 (г. Пусан, Республика Корея, 2024).

5. Межведомственная Научно-техническая конференция «Перспективы применения оптико-лазерных систем и программных комплексов в системах наземного, воздушного и космического назначения» АО «НПК СПП» (г. Казань, 2024).

6. Совместная III Отраслевая научно-практическая конференция «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» (г. Самара, 2024).

7. XXIII Научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ПАО «РКК «Энергия» (г. Королёв, 2024).

8. 5th BRICS/Africa SciTech Forum 2024 (г. Москва, 2024).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных работах (из них 3 статьи [2, 6, 8] – в изданиях, входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, а также 1 статья [7] – в журналах из баз данных Web of Science и Scopus).

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения; четырёх глав; заключения и списка литературы. Общий объём диссертации 129 страниц, включая 14 таблиц и 63 рисунка и схем. Список использованной литературы содержит 133 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В ней рассмотрены специфика проблематики техногенного засорения околоземного пространства и существующие технические средства мониторинга с описанием их ограничений в части возможностей мониторинга ТКО в ОКП. Также приводится исчерпывающий анализ научных работ по исследуемой тематике.

Анализ существующего опыта позволяет сделать заключение о том, что в большинстве случаев в качестве орбиты для космической системы мониторинга предлагается ССО в окрестности плоскости света-тени.

Вторая глава посвящена разработке методики формирования баллистического построения космической системы мониторинга ТКО в ОКП.

На основе анализа имеющегося опыта в части мониторинга ТКО в ОКП бортовыми ОЭС предлагается разместить КА мониторинга на околоспутниковый ССО, при этом бортовые ОЭС должны быть ориентированы от Солнца. Концепция космической системы мониторинга имеет представлена на Рисунке 1.

Основные положения концепции космической системы мониторинга:

- КА располагаются на солнечно-синхронной орбите (ССО) в окрестности плоскости света-тени;
- Направление визирования ОЭС от Солнца;

- ОЭС функционируют в режиме непрерывного обзора;
- КА стабилизированы «в надир».

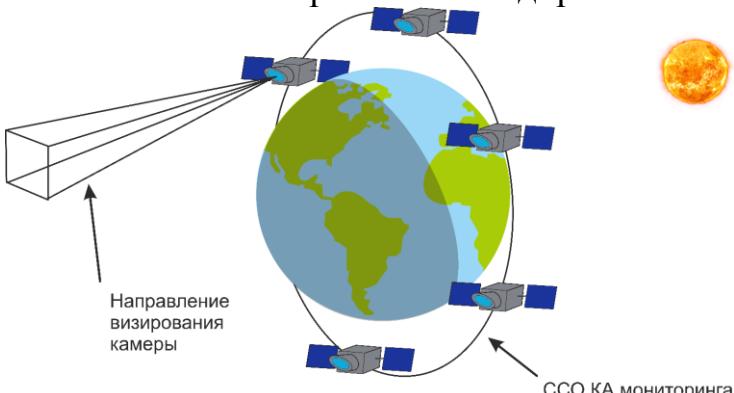


Рисунок 1. Концепция космической системы мониторинга ТКО в ОКП

- Количество КА мониторинга;
- Относительно расположение КА мониторинга на ССО.

Сформированная на основе данных параметров космическая система должна обеспечивать эффективный мониторинг ТКО в ОКП. В качестве основополагающих предлагается выделить следующие показатели эффективности мониторинга:

- Потенциальная глобальность мониторинга (обеспечение полноты данных об обстановке в части ТКО в ОКП);
- Периодичность наблюдения одного и того же ТКО (обеспечение актуальности данных об орбитах ТКО);
- Точность определения орбиты ТКО (обеспечение точности и достоверности информации об орбитах ТКО).

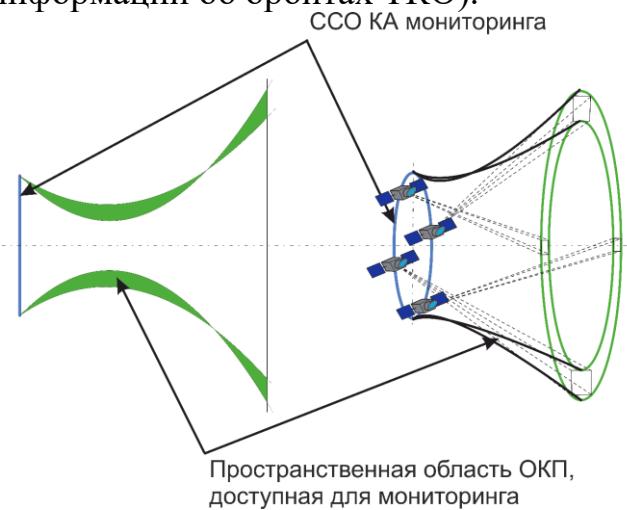


Рисунок 2. Концепция космической системы мониторинга ТКО в ОКП

при отсутствии временных ограничений. Под периодичностью наблюдения одного и того же ТКО понимается отношение количества наблюдений этого ТКО к заданному интервалу времени.

Методики оценок показателей эффективности мониторинга основаны на геометрическом представлении области ОКП, доступной для мониторинга

Под баллистическим построением подразумевается ключевой набор параметров, в полной мере характеризующий проектный облик космической системы мониторинга. Предлагается следующий набор параметров:

- Высота солнечно-синхронной орбиты (ССО);
- Направление визирования ОЭС;

Под наблюдением понимается факт попадания ТКО в поле зрения бортовых ОЭС. Формирование первичной измерительной информации в виде так называемых треков или дуг измерений, а также получение значений самих измерений траекторных параметров является отдельной задачей, не относящейся к данной работе. Под потенциальной глобальностью мониторинга понимается то количество ТКО, которое будет наблюдаемым для космической системы мониторинга

космической системой при заданных параметрах баллистического построения (Рисунок 2). При этом показатель потенциальной глобальности зависит высоты и ориентации бортовых ОЭС. Показатель периодичности наблюдения одного и того же ТКО зависит от количества КА мониторинга и их относительного расположения на орбите.

На рисунках 3 и 4 приведены блок-схемы, описывающие методики оценок показателей эффективности мониторинга.



Рисунок 3. Блок-схема методики оценки показателя потенциальной глобальности мониторинга

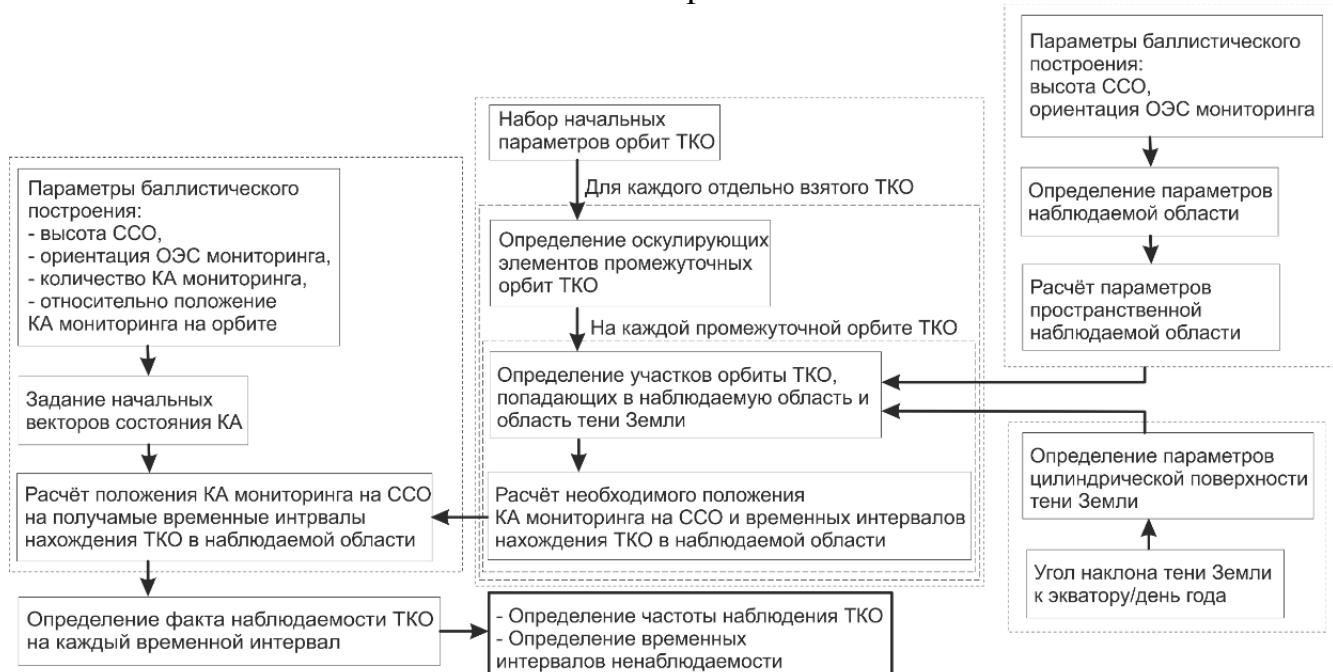


Рисунок 4. Блок-схема методики оценки показателя периодичности наблюдения одного ТКО

В третьей главе приводятся результаты оценок показателей эффективности мониторинга для различных вариантов баллистического построения космической системы. На основе анализа данных оценок формируются предварительные варианты баллистического построения космической системы мониторинга.

Сначала производится оценка показателя потенциальной глобальности мониторинга, исходя из которой определяются такие параметры баллистического построения как высота ССО и направление визирования ОЭС мониторинга, обеспечивающие эффективный мониторинг ТКО в ОКП.

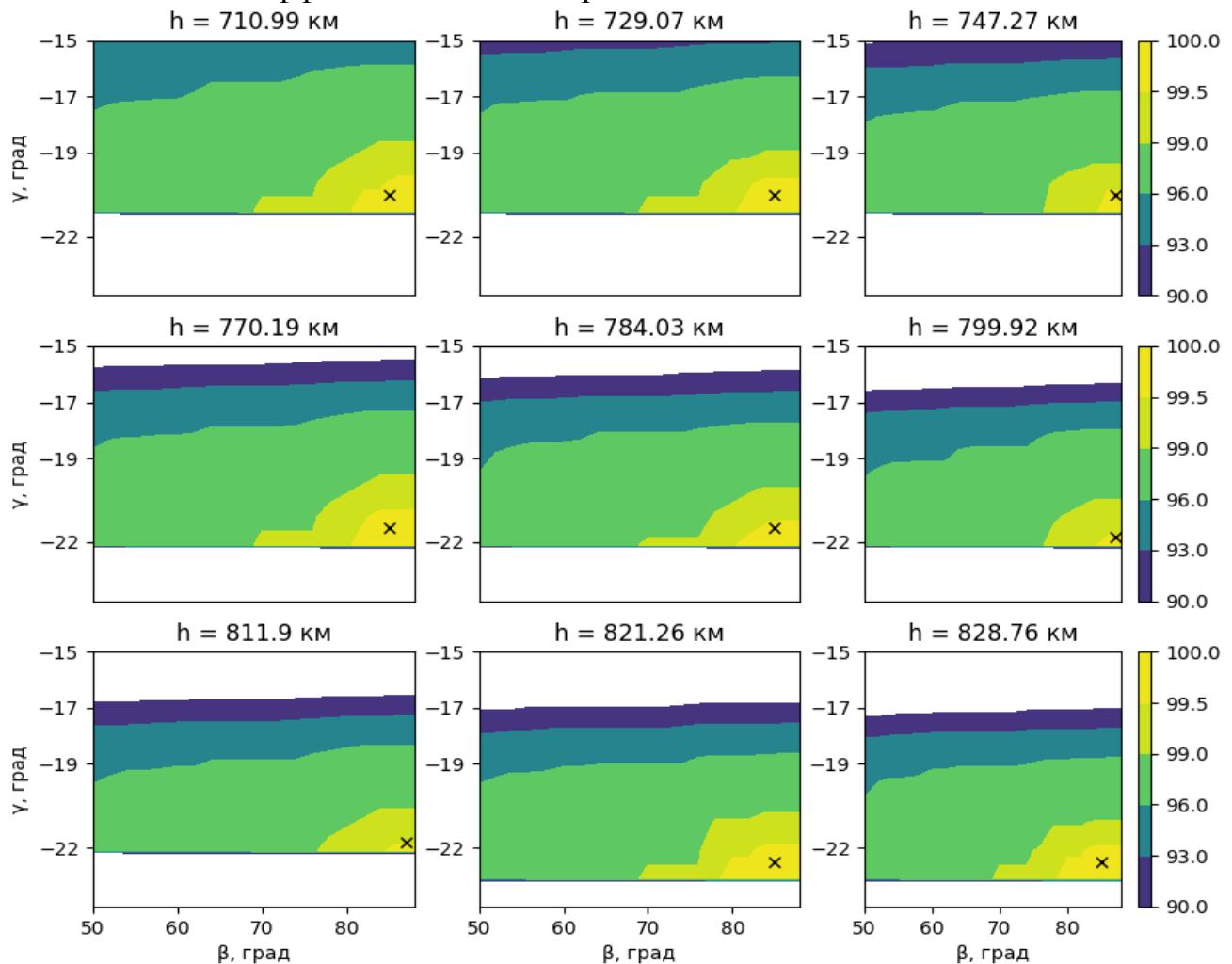


Рисунок 5. Динамика изменения потенциального количества (от 90% до 100%) наблюдаемых ТКО КС мониторинга для кратных ССО при варьировании направления оси визирования ОЭС

Анализ зависимости показателя потенциальной глобальности мониторинга показывает, что для каждой высоты ССО можно выделить значения углов ориентации оси визирования ОЭС, при которых показатель потенциальной глобальности будет стремиться к 100 %. Это возможно при $\beta \rightarrow 90^\circ$, т.е. когда ось визирования лежит в плоскости ССО. В этом случае также исключается влияние тени Земли на оценку данного показателя.

Необходимость точного знания параметров орбит КА мониторинга в моменты наблюдений ТКО приводит к тому, что в качестве ССО для КА мониторинга предлагается использовать кратные орбиты, по аналогии с КА ДЗ3. Другим фактором, влияющим на точность определения ССО КА мониторинга, будет являться верхняя атмосфера Земли. С другой стороны, на более высоких (от 8

порядка 900 км) орбитах велико влияние радиационных поясов Земли на электронную бортовую аппаратуру КА мониторинга, в особенности на ОЭС. Таким образом, выделены несколько кратных ССО в промежутке высот от 700 до 850 км, которые могут быть выбраны в качестве целевой орбиты функционирования космической системы мониторинга (Рисунок 5).

На рисунке 5 приведена зависимость параметров ориентации бортовых ОЭС на распределение наблюдаемых ТКО.

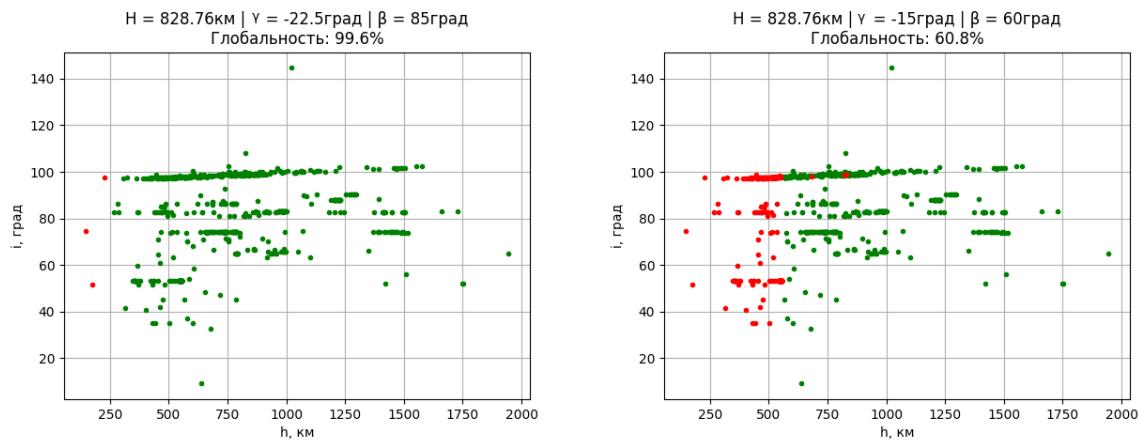


Рисунок 6. Распределение наблюдаемых и ненаблюдаемых орбит для высоты ССО 828.76 км при различных параметрах ориентации ОЭС

Оценка периодичности наблюдения одного и того же ТКО в зависимости от количества КА мониторинга и их относительного положения на орбите показывает, что при прочих равных, разбиение КА мониторинга на группы по 2 аппарата позволяет улучшить значение оцениваемого показателя (Рисунок 6).

По графику, представленному на Рисунке 7 видно, что при прочих равных количества эпизодически наблюдаемых ТКО уменьшается при увеличении количества КА мониторинга при учёте разбиения КА по парам по сравнению с равноудалённым размещением КА на ССО. Это также подтверждается детальным анализом распределения эпизодически наблюдаемых ТКО по длительности наибольших интервалов между наблюдениями (>1 сут) и количестве таких интервалов (Рисунок 8).

Анализ распределения, представленного на Рисунке 8 показывает, что для некоторых ТКО в 10 раз уменьшается количество длительных интервалов между наблюдениями. Однако можно отметить, что разбиение по группам не влияет на

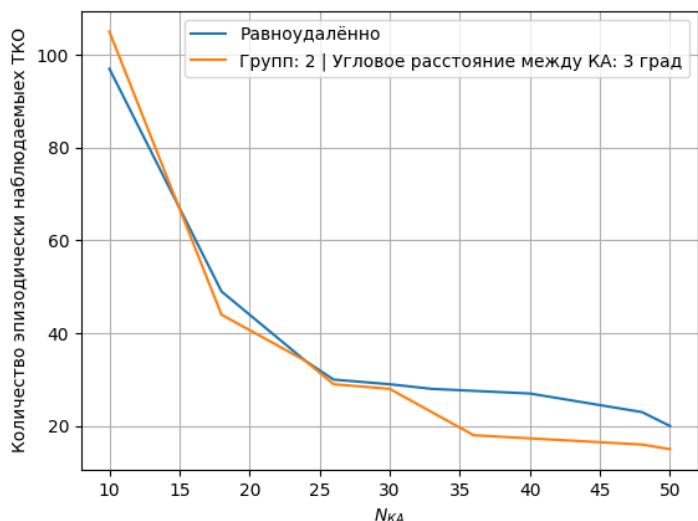


Рисунок 7. Зависимость количества эпизодически наблюдаемых ТКО в зависимости от количества КА мониторинга и конфигураций их относительного расположения при одинаковых высотах ССО и параметров ориентации ОЭС

некоторые эпизодически наблюдаемые ТКО, для которых существует 1-2 длительных интервалов между последовательными наблюдениями.

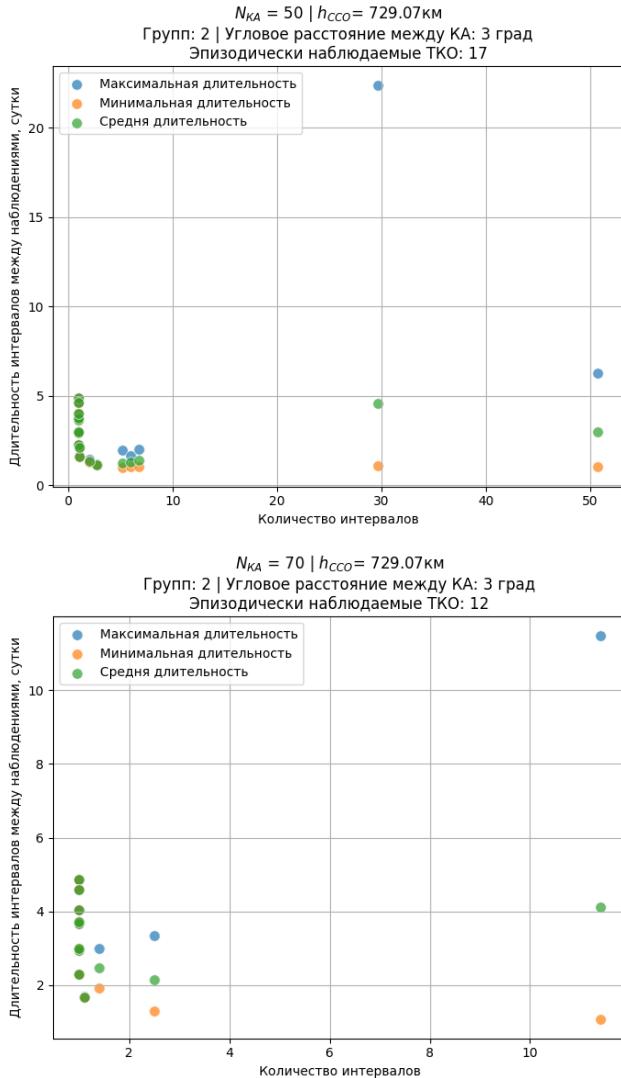


Рисунок 8. Распределения эпизодически наблюдаемых ТКО по длительности наибольших интервалов между наблюдениями (>1 сут) и количестве таких интервалов при $h_{CCO} = 729.07$ км и $N_{KA} = 50$

космической системы (Таблица 1).

Четвертая глава посвящена оценке третьего показателя эффективности мониторинга – точности определения параметров движения ТКО по получаемым оптическим измерениям. Оценка данного показателя требует особого подхода в части решения задачи предварительного определения орбиты ТКО, что обусловлено низкой (порядка 10-20 секунд) длительностью одного измерения. Это приводит к невозможности решения задачи предварительного определения параметров движения классическими методами.

В связи с этим предлагается подход, основанный на анализе получаемых измерений и выявлении ограничений возможных орбит ТКО, которым данное измерение может принадлежать. Также данный подход позволяет решить задачу идентификации получаемых измерений, однако в диссертационном исследовании

распределение эпизодически наблюдаемых ТКО по высоте и наклонению их орбит представлено на Рисунке 9. Данное распределение показывает, что наибольшее количество эпизодически ненаблюдаемых ТКО располагаются на орбитах, наклонение которых приблизительно равно 80 градусам, т.е. $i = \pi - i_{CCO}$. Это обуславливается тем, что в процессе относительной прецессии плоскости орбит КА мониторинга и ТКО становятся компланарными, а т.к. принятое направление визирования не лежит в плоскости орбит КА мониторинга. Такие ненаблюдаемые зоны будут индивидуальны для каждого баллистического построения. И увеличение КА мониторинга не приведет к устранению ненаблюдаемых зон для данных ТКО. Увеличение КА мониторинга с 50 до 70 не даёт существенного уменьшения как количества эпизодически наблюдаемых ТКО, так и в части длительных интервалов между наблюдениями.

На основе полученных оценок был сформирован следующий перечень возможных параметров баллистического построения

данная задача не рассматривается, т.е. принимается, что измерения принадлежат одному ТКО.

Высота ССО, км	γ , град
710.99	-20.5
729.07	-20.5
747.27	-20.5
770.19	-21.5
784.03	-21.5
799.92	-21.8
811.9	-21.8
821.26	-22.5
828.76	-22.5

Для решения задачи предварительного определения орбиты по измерениям от космической системы мониторинга по очень коротким дугам измеренных орбит можно воспользоваться нелинейным методом наименьших квадратов (МНК) с решением по алгоритму Левенберга-Маркварда. Данный метод широко применяется для решения подобного класса задач и имеет хорошую сходимость по сравнению с имеющимися аналогами. Также важно отметить, что классические методы предварительного определения орбит непригодны для получения решения, что обусловлено относительно большим интервалом времени между измерениями (могут достигать нескольких суток).

В качестве искомых параметров для решения задачи МНК выступают ρ и $\dot{\rho}$ – дальность и радиальная скорость на момент первого измерения. Минимизируются невязки между имеющимися угловыми измерениями и рассчитываемыми при заданных ρ и $\dot{\rho}$ на момент первого измерения.

Оценка точности определения орбит производится на основе метода

Монте-Карло. К моделируемым измерениям добавляется Гауссовский шум с известным среднеквадратическим отклонением. Далее решается задача предварительного определения орбиты. Полученные значения параметров движения на момент первого измерения сравниваются с эталонными значениями, что позволяет оценить отклонения по положению и по скорости. На основе многократного повторения данной процедуры при различных начальных значениях ошибок измерений можно оценить статистические характеристики, показывающие

Таблица 1.

Предлагаемые параметры баллистического построения, обеспечивающие эффективный мониторинг ТКО в ОКП ($\beta = 90^\circ$, N_{KA} в группе = 2, $\varphi = 3^\circ$, $N_{KA} = 50 - 70$).

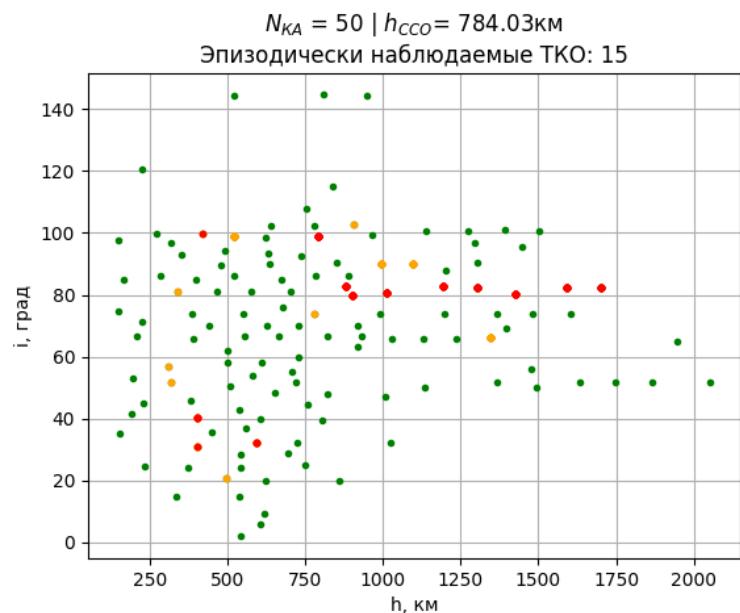


Рисунок 9. Распределение по наклонению и высоте наблюдаемых (зелёные) и эпизодически наблюдаемых (красные) ТКО при следующем варианте баллистического построения космической системы

точность определения орбиты ТКО. Графически методика оценки точности определения орбиты ТКО представлена на Рисунке 10.

Задачу минимизации можно формализовать следующим образом:

$$J = \sum_{i=2}^N \frac{1}{2} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}})^T (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (1)$$

Где J – минимизируемый функционал; N – число измерений; $\hat{\mathbf{y}}$ – известный вектор угловых измерений ($\alpha, \delta, \dot{\alpha}, \dot{\delta}$); \mathbf{y} – рассчитанный вектор угловых измерений при заданных ρ и $\dot{\rho}$ на момент первого измерения, α, δ – склонение и прямое восхождение относительно наблюдателя соответственно, $\dot{\alpha}, \dot{\delta}$ – угловые скорости изменения склонения и прямого восхождения относительно наблюдателя соответственно.

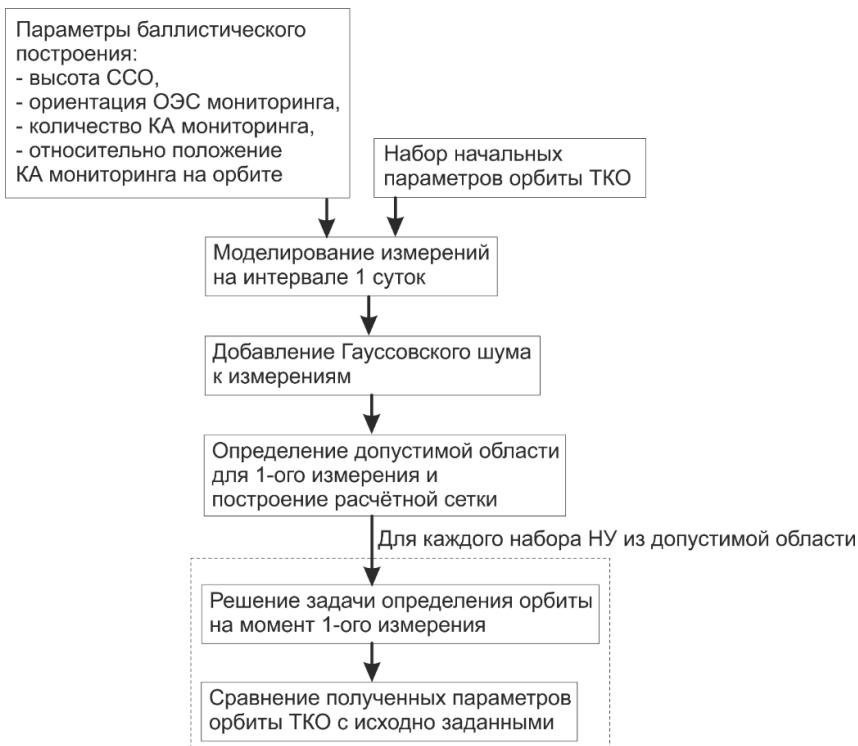


Рисунок 10. Методика оценки точности определения орбиты ТКО

В качестве примера для получения численных оценок рассматривается орбита ТКО на НОО, начальные данные которого взяты из актуального каталога космических объектов.

Для ТКО были получены изменения параметров орбиты космической системой на интервале 2-х суток. На рисунке 11 показаны относительные положения орбит ТКО и ССО КА мониторинга, а также обозначены моменты измерений.

Было проведено

моделирование измерений космической системой, для которой принимались следующие параметры космической системы мониторинга:

$$h_{\text{ССО}} = 799.92 \text{ км}, N_{\text{КА}} = 10, \gamma = -21.5^\circ, \beta = 85^\circ, \text{поле зрения ОЭС } 2^\circ.$$

Параметры орбиты ТКО следующие:

$$a = 7380.459 \text{ км}, e = 0.002244, i = 80.4639^\circ, \Omega = 10^\circ, \omega = 230^\circ.$$

Рассматривается возможность определения орбиты по одному, по трём и по четырём измерениям без учёта влияния ошибок измерений. Ошибки измерения учитываются для определения орбиты по трём и четырём измерениям. Среднеквадратическое отклонение задаваемых ошибок составляет 1 угловую секунду, что соответствует точности измерений современных оптических средств.

На рисунке 12 приведено пространство исходных данных (допустимая область) для решения задачи определения орбиты, которое построено для первого измерения. Накладываемые ограничения: наибольшее значение большой полуоси

$a_{max} = 10000$ км, наименьшее значение большой полуоси $a_{min} = 6500$ км, наибольшее значение эксцентриситета $e = 0.01$. Также в рамках данной работы не рассматривается

решение задачи

идентификации

измерений, хотя на

практике решение задачи

предварительного

определения орбиты

входит в задачу

идентификации

измерений, т.к. таким

образом можно

отфильтровать измерения

и подтвердить

принадлежность данных

измерений определённому

объекту.

Исходя из

ограничений,

изображённых на Рисунке

12, в качестве первого

приближения выбираются

участки, лежащие в

пределах между зелёной и

красной кривыми, и при этом

внутри голубых областей.

Наборы таких значений

определяются графически,

для каждого из них решается

задача предварительного

определения орбиты.

В качестве итогового решения выбирается то, для которого

было получено решения с наименьшим СКО.

Точность предварительного определения орбиты по одному измерению составляет порядка 3.7 км по положению и 5 м/с по скорости. Точность предварительного определения орбиты по трём и четырём измерениям составляет порядка 50 м по положению. Вектор скорости определяется с точностью до 10^{-5} км/с.

Можно сказать о том, что алгоритм позволяет предварительно определять параметры орбиты КМ с достаточно хорошей точностью. Также по одному измерению возможно предварительно определить орбиту КМ, однако точность определения орбиты без учёта погрешностей измерений (т.е. только за счёт точности алгоритма) на порядок хуже, чем при определении орбиты по нескольким измерениям. Кроме того, полученное измерение имеет большую длительность (порядка 100 с) по сравнению с другими измерениями, длительность которых может быть порядка 20-30 с. Длительность наблюдения, а значит и измерения можно повысить за счёт увеличения поля зрения ОЭС, однако это может привести к появлению дисторсии, что существенно может ухудшить качество самих измерений.

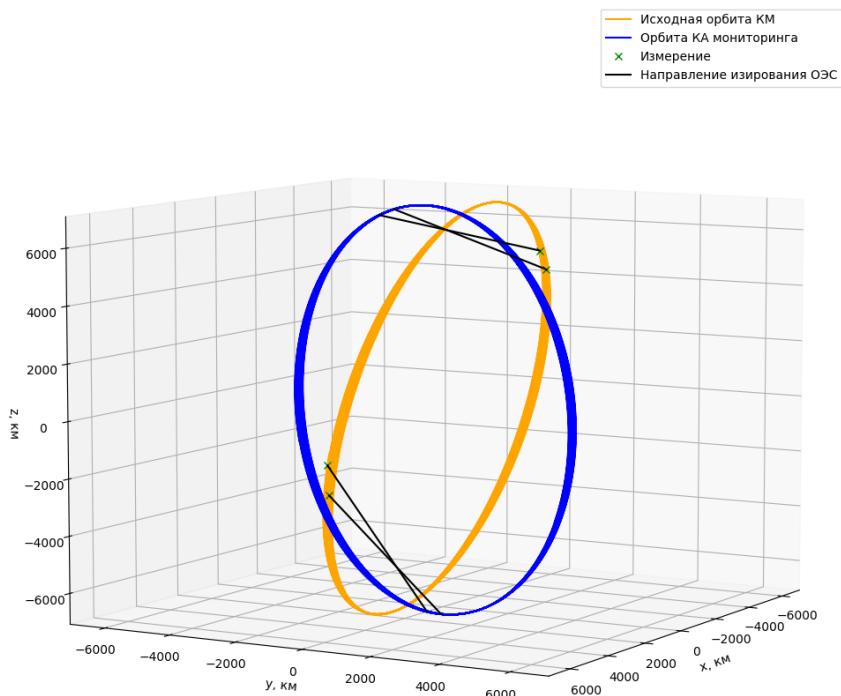


Рисунок 11. Орбита КА мониторинга (синяя) и КМ (оранжевая), а также моменты измерений (зеленым показаны точки орбиты КМ в моменты наблюдений, черными прямыми показаны направления визирования ОЭС в моменты наблюдений)

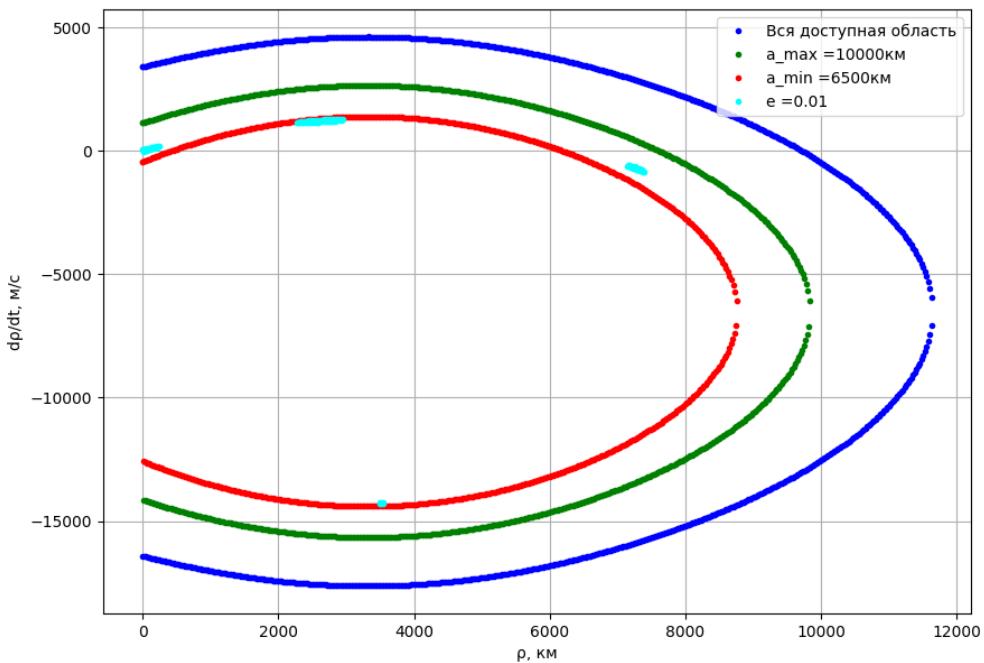


Рисунок 12. Ограничение допустимой области возможных орбит для первого измерения. Синим цветом ограничены все возможные околоземные орбиты, зеленым цветом ограничены орбиты с большой полуосью 10000 км, красным цветом ограничены орбиты с большой полуосью 6500 км, голубым цветом ограничены орбиты, имеющие эксцентриситет 0.01

При учёте погрешностей измерений были получены следующие статистические характеристики точности определения орбиты ТКО для 100 итераций:

для трёх измерений: $\mu_r = 5.99 \text{ км}$, $\sigma_r = 3.98 \text{ км}$, $\mu_V = 8.48 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\sigma_V = 4.07 \frac{\text{м}}{\text{с}}$;

для четырёх измерений: $\mu_r = 5.19 \text{ км}$, $\sigma_r = 3.14 \text{ км}$, $\mu_V = 7.46 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\sigma_V = 3.69 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Исходя из полученных значений статистических характеристик можно сделать вывод о том, что количество измерений влияет на точность предварительного определения параметров орбиты: при увеличении числа измерений улучшаются значения статистических характеристик, а значит можно говорить о более достоверном решении.

Рассматривалась зависимость точности предварительного определения орбит от параметров ориентации ОЭС КА мониторинга. Учитывались 2 случая, для которых параметр угла ориентации ОЭС составлял $\beta = 85^\circ$ и $\beta = 50^\circ$. Это связано с тем, что фазовый угол Солнце – наблюдаемый КО – КА мониторинга φ оказывает существенное влияние на видимую звёздную величину наблюдаемых КО.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что существенно ухудшается точность определения орбиты при $\beta = 50^\circ$. В этой связи при выборе параметров баллистического построения можно попробовать определить компромисс между предельными значениями видимой звездной величины и глобальностью мониторинга.

В общих выводах и заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки методики формирования баллистического построения космической системы мониторинга ТКО в ОКП оптическими средствами на основе оценок показателей эффективности мониторинга.

Основные выводы и результаты работы состоят в следующем:

1. Определен и обоснован выбор показателей эффективности мониторинга ТКО в ОКП, а именно глобальность мониторинга и периодичность наблюдения одного и того же ТКО. Разработаны методики их качественной оценки на основе геометрического представления пространственной области ОКП, доступной для мониторинга.
2. Получены оценки данных показателей эффективности при варьировании ключевых проектных параметров баллистического построения.
3. Разработана методика определения баллистического построения космической системы, обеспечивающая эффективный мониторинг ТКО:
 - Показано, что при любой высоте ССО возможно максимизировать показатель глобальности мониторинга за счёт угла ориентации оси визирования ОЭС, а именно при $\beta \rightarrow \frac{\pi}{2}$.
 - Показано, что относительное расположение КА мониторинга и их количество влияет на показатель периодичности наблюдения одного и того же ТКО. В частности, относительное расположение КА мониторинга по группам позволяет сократить временные интервалы между наблюдениями одного и того же ТКО по сравнению с равноудалённым размещением КА мониторинга на ССО.
 - На основе проведённых оценок предложены варианты космической системы мониторинга ТКО в ООКП для различных высот ССО и 72 КА мониторинга, разделённых на 36 равноудалённых друг от друга групп по 2 КА, расстояние между КА в группе составляет 3 градуса.
4. Разработана методика оценки точности предварительного определения орбит по измерениям ОЭС, установленных на борту КА, на основе классического метода определения орбит методом наименьших квадратов в сочетании с методом допустимых областей для выбора начального приближения. Получены оценки точности предварительного определения орбиты ТКО в области НОО при варьировании числа измерений, а также при изменении параметров ориентации ОЭС.
5. На основе разработанных методик были созданы соответствующие наборы программ для получения численных результатов.
6. Предложенная методика может применяться на этапе проектирования космических систем мониторинга ТКО в ОКП подобного рода для оперативного определения баллистического построения системы в первом приближении.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Беляев, А. А. Подход к определению параметров орбитального построения группировки космических аппаратов мониторинга техногенных космических

объектов / А. А. Беляев, В. В. Корянов, А. А. Гаврилова // XLVIII Академические чтения по космонавтике : Сборник тезисов посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства, Москва, 23–26 января 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 2024. С. 185-187. (0.2 п.л. (0.06 п.л.))

2. Беляев, А. А. К вопросам определения параметров орбитальной структуры космической системы мониторинга техногенных космических объектов / А. А. Беляев, В. В. Корянов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 12(156). – DOI 10.18698/2308-6033-2024-12-2412. (1.2 п.л. (0.6 п.л.))

3. Беляев, А. А. Подход к оценке глобальности мониторинга ТКО орбитальными оптическими средствами / А. А. Беляев, А. А. Гаврилова, В. В. Корянов // Идеи Циолковского в теориях освоения космоса : Материалы 58-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 19–21 сентября 2023 года. – Калуга: ИП Стрельцов И.А., 2023. – С. 263-267. (0.3 п.л. (0.1 п.л.))

4. Методика оценки глобальности мониторинга техногенных космических объектов средствами космического базирования / А. А. Беляев, А. А. Гаврилова, Г. Г. Ступак, В. В. Корянов // XLVII Академические чтения по космонавтике 2023 : Сборник тезисов, посвященный памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 24–27 января 2023 года. Том 2. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2023. С. 294-296. (0.2 п.л. (0.05 п.л.))

5. Построение орбитальной группировки космических аппаратов мониторинга околоземного космического пространства в составе системы «Млечный путь» / В. В. Корянов, А. А. Гаврилова, А. А. Беляев, Г. Г. Ступак // XLVI Академические чтения по космонавтике : Сборник тезисов, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. В 4-х томах, Москва, 25–28 января 2022 года. Том 3. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 83-85. (0.2 п.л. (0.05 п.л.))

6. Гаврилова, А. А. Исследование эффективности методов оценивания параметров движения техногенных космических объектов по разнородной измерительной информации / А. А. Гаврилова, А. А. Беляев, Г. Г. Ступак // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 5(149). DOI 10.18698/2308-6033-2024-5-2360. (1 п.л. (0.4 п.л.))

7. Belyaev A., Koryanov V., Gavrilova A. An Approach for Satellite Constellation Design for Space Object Observation // Proceedings of the IAC. — Milan, Italy, October 14–18, 2024. P. 610–613. DOI: 10.52202/078367-0066. (0.8 п.л. (0.3 п.л.))

8. Беляев, А. А. Анализ возможности определения орбит космического мусора по оптическим измерениям космической системы мониторинга околоземного космического пространства / А. А. Беляев, В. В. Корянов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2025. № 3(159). DOI: 10.18698/2308-6033-2025-3-2434. (1.7 п.л. (0.85 п.л.))