

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Иванушкин Максим Александрович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МНОГОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ С УЧЁТОМ
ВЫБОРА КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ПУНКТОВ ПРИЁМА
ИНФОРМАЦИИ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Салмин Вадим Викторович,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Самара – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Проблема синтеза многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли с учетом структуры орбитальной группировки и наземных станций приема информации.....	13
1.1 Анализ современного состояния и тенденций развития многоспутниковых систем ДЗЗ.....	13
1.2 Оценка эффективности функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли.....	26
1.3 Постановка задачи оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ с учётом информационного взаимодействия орбитального и наземного сегментов	35
1.4 Выводы по первой главе	42
Глава 2. Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли	44
2.1 Описание методики	44
2.2 Методика выбора оптимального расположения наземных станций	50
2.3 Разработка имитационной модели для оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ.....	62
2.4 Выводы по второй главе	74
Глава 3. Разработка программного комплекса для моделирования систем ДЗЗ	76
3.1 Алгоритм и структура программного обеспечения	76
3.2 Описание программных модулей.....	80
3.3 Выводы по третьей главе	94
Глава 4. Выбор проектных параметров и оценка показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ.....	96
4.1 Постановка задачи создания космической системы квазинепрерывного глобального обзора со сверхвысоким пространственным разрешением.....	96
4.2 Анализ проектных параметров целевого информационного тракта космического аппарата дистанционного зондирования Земли	97
4.3 Выбор орбитальных параметров группировки КА, обеспечивающей квазинепрерывный обзор.....	99
4.4 Оценка периодичности наблюдения локальных районов Земли группировкой КА	105

4.5 Поиск оптимального расположения наземных пунктов приёма информации	109
4.6 Оценка оперативности доставки информации на наземные пункты приёма от группировки КА	120
4.7 Анализ показателей функционирования радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли в решении задач мониторинга Арктического региона и Северного морского пути	123
4.8 Выводы по четвертой главе	142
Заключение	144
Список литературы	146
Приложение А Результаты моделирования информационного обмена спутниковых группировок и наземных станций	157
Приложение Б Результаты моделирования вариантов орбитального построения радиолокационных космических систем	175
Приложение В Акт внедрения результатов диссертационной работы Акционерного общества «Российские космические системы»	188
Приложение Г Протокол внедрения результатов диссертационной работы Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс»	189
Приложение Д Акт внедрения результатов диссертационной работы Общества с ограниченной ответственностью	190
Приложение Е Акт внедрения результатов диссертационной работы в образовательный процесс	191

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Развитие современных многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) характеризуется существенным увеличением количества космических аппаратов (КА) на орбите и возрастающими требованиями к оперативности и периодичности получаемых данных. В настоящее время ведущие космические державы и частные компании активно развёртывают многочисленные группировки малых космических аппаратов, способных обеспечивать глобальное покрытие земной поверхности с высокой периодичностью наблюдения. По данным аналитических агентств, в 2024 году было успешно запущено около 300 КА ДЗЗ (Bryce Space and Technology Report), а суммарное количество спутников ДЗЗ на орбите превысило 1000 единиц. В период с 2024 по 2034 ожидается запуск более 5400 КА ДЗЗ, что в 2,8 раз больше, чем в прошлое десятилетие.

Однако эффективность функционирования многоспутниковых систем ДЗЗ определяется не только орбитальной группировкой, но и наземной инфраструктурой, обеспечивающей получение, обработку и распространение данных. Фактически, при существующих темпах роста количества спутников наблюдается явный дисбаланс между возможностями орбитальной группировки по сбору информации и возможностями наземной инфраструктуры по её приёму и обработке.

Особую актуальность приобретает задача повышения целевой эффективности функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли в контексте роста стратегического значения Арктического региона для Российской Федерации в связи с развитием Северного морского пути, освоением природных ресурсов и изменением климата. Эффективный мониторинг ледовой обстановки и навигационных условий в Арктике является критически важным для обеспечения безопасности судоходства и экономического развития региона.

Существующие методики синтеза космических систем ДЗЗ традиционно фокусируются на оптимизации орбитальной группировки, в то время как вопросы оптимального размещения наземных станций приёма информации необходимых для оперативного получения данных о стратегически важных регионах, в том числе таких как Арктика, остаются недостаточно проработанными.

В этих условиях разработка методики оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ, учитывающих взаимодействие орбитальной группировки и наземной инфраструктуры, представляется **актуальной научно-технической задачей**, решение которой позволит обеспечить разработку перспективных космических систем наблюдения с повышенными показателям периодичности наблюдения и оперативности доставки целевой информации на наземные пункты приёма.

Степень разработанности темы исследования

Методы анализа и синтеза космических систем наблюдения наиболее полно изложены А.А. Лебедевым, В.В. Малышевым, Г.З. Давлетшиным, Ф.Р. Ханцеверовым, Б.С. Скребушевским и др. Также следует отметить теоретические и прикладные результаты в области проектирования космических систем мониторинга Д.И. Козлова, Г.П. Аншакова, Р.Н. Ахметова, А.В. Соллогуба. Методы орбитального построения кинематически правильных спутниковых систем глобального обзора наиболее полно изложены в работах Г.В. Можяева, J. Walker, Б.Р. Быркова, L. Rider, W. Adams, T.Lang, В.К. Саульского, Ю.П. Улыбышева. Задача распределения потоков целевой информации при функционировании космических систем дистанционного зондирования Земли решалась А.А. Емельяновым, А.В. Старковым. В работах В.Ю. Ключникова, А.В. Соллогуба, А.Ю. Потюпкина, В.В. Бетанова, В.В. Широкова рассматривались вопросы управления многоспутниковыми группировкам. Вопросам повышения эффективности информационного обмена между наземным и космическим сегментом путем использования межспутниковых линий связи посвящены работы О.В. Карсаева, E. Ekici, S. Burleigh.

В большинстве существующих работ орбитальная группировка и наземная инфраструктура рассматриваются как отдельные системы, оптимизируемые по независимым критериям, без учёта их взаимного влияния на комплексную эффективность функционирования системы. Методы орбитального проектирования группировок, как правило, ориентированы на обеспечение заданных характеристик наблюдения территорий без детального учёта ограничений наземного сегмента по пропускной способности каналов связи, возможностям одновременного обслуживания множества космических аппаратов и географическому размещению пунктов приёма информации. Существующие исследования в области организации информационного обмена между орбитальными группировками и наземным сегментом преимущественно концентрируются на оптимизации использования уже развёрнутой инфраструктуры. Однако для перспективных многоспутниковых группировок такой разрозненный подход приводит к недоиспользованию ресурсов космического сегмента из-за недостаточной пропускной способности наземных средств, увеличению временных задержек в доставке целевой информации потребителям, снижению общей производительности системы.

Недостаточная проработанность вопросов комплексной оценки показателей функционирования многоспутниковых систем ДЗЗ с учётом взаимодействия орбитальной и наземной составляющих определяет необходимость проведения данного исследования.

Объектом исследования является многоспутниковая космическая система, включающая орбитальную группировку и наземные станции приёма.

Предмет исследования

Показатели функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли.

Цель работы

Повышение целевой эффективности функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли.

Задачи работы

1. Разработка методики выбора оптимального расположения наземных станций приёма информации необходимых для низкоорбитальной многоспутниковой группировки с учётом динамики орбитального движения и информационных потоков, формируемых космической системой.

2. Разработка масштабируемой имитационной модели для оценки ключевых показателей функционирования космических систем ДЗЗ, включающих низкоорбитальные многоспутниковые группировки и наземные станции приема, учитывающую параметры орбитальной группировки, характеристики полезной нагрузки, параметры наземной инфраструктуры и информационного взаимодействия между элементами системы.

3. Разработка программного комплекса для моделирования функционирования низкоорбитальных космических систем, позволяющего проводить многовариантные исследования эффективности функционирования данных систем.

4. Апробация разработанной методики и программного комплекса на примере решения двух практических задач по оценке целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, обеспечивающих глобальный высокодетальный мониторинг земной поверхности, а также космических систем, предназначенных для мониторинга Арктики и Северного морского пути.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок, отличающаяся тем, что выбор координат размещения станций осуществляется жадным алгоритмом с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата.

2. Разработана масштабируемая агрегированная имитационная модель для оценки ключевых показателей функционирования низкоорбитальных космических

систем ДЗЗ, позволяющая анализировать конфигурации до двухсот космических аппаратов и произвольным количеством наземных станций, отличающаяся тем, что моделируется работа целевой аппаратуры наблюдения с расчётом объёма генерируемых данных, состояние бортовой памяти космических аппаратов рассчитывается интегрированием скоростей поступления данных от целевой аппаратуры и передачи на наземные станции, а сеансы связи моделируются с использованием очередей передачи данных, упорядоченных по времени съёмки.

3. Разработана методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования орбитального движения с использованием дискретной модели земной поверхности в виде регулярной сетки точек, отличающаяся тем, что для каждой точки сетки вычисляются временные ряды наблюдений с расчётом статистических характеристик (средняя, минимальная и максимальная периодичность наблюдения, коэффициент вариации периодичности, время доставки информации на наземную станцию), что позволяет получать количественные оценки процента покрытия заданного региона, периодичности наблюдения и оперативности доставки информации в зависимости от варьируемых параметров орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и расположения наземных станций приёма.

Теоретическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в разработке масштабируемой агрегированной математической модели, сочетающей имитационное моделирование орбитального сегмента космической системы наблюдения, модель информационных потоков с учетом характеристик съемочной аппаратуры, бортового запоминающего устройства и высокоскоростной радиолинии космических аппаратов, а также моделирование информационного взаимодействия с наземными пунктами приёма информации с оптимизацией их расположения.

Практическая значимость

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанной методики, модели и программного комплекса для решения задач проектирования и оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли как на ранних стадиях разработки, так и на стадии эксплуатации. Разработанный инструментарий использован для решения двух практических задач: определения оптимальных параметров космической системы квазинепрерывного глобального обзора с обоснованием количества космических аппаратов, параметров орбит и расположения наземных пунктов приёма информации, а также для выбора архитектуры радиолокационной космической системы мониторинга Арктического региона с обоснованием комбинированной схемы построения орбитальной группировки, обеспечивающей требуемые показатели покрытия и периодичности наблюдения.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы системного анализа, теории оптимального управления, математического моделирования, оптимизации, теории орбитального движения, теории массового обслуживания. Для проведения имитационного моделирования применены численные методы интегрирования дифференциальных уравнений. Программная реализация моделей и алгоритмов выполнена с использованием современных технологий создания программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок, основанная на жадном алгоритме с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата.

2. Масштабируемая имитационная модель для оценки целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, позволяющая

анализировать конфигурации до двухсот космических аппаратов и произвольным количеством наземных станций.

3. Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования орбитального движения с использованием дискретной модели земной поверхности в виде регулярной сетки точек, в которой для каждой точки сетки вычисляются временные ряды наблюдений с расчётом статистических характеристик.

4. Результаты апробации разработанных методик, имитационной модели и программного комплекса на примере проектирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ.

Область исследования соответствует направлениям исследований паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика в части пунктов: 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановки задач, обоснованностью применяемых математических методов, подтверждается результатами имитационного моделирования и согласованностью с данными о целевых показателях функционирующих низкоорбитальных космических систем дистанционного зондирования Земли.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях:

VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VI Козловские чтения) (г. Самара, АО «РКЦ «Прогресс», 30.09-03.10.2019);

XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства;

I Всероссийская научно - техническая конференция «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «малые космические аппараты»;

XXII Научно - техническая конференция учёных и специалистов, посвященная 60 - летию полета Ю.А. Гагарина, 75 - летию ракетно - космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия»;

IX Международная конференция и молодежная школа "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2023);

X Международная конференция и молодежная школа "Информационные технологии и нанотехнологии" (ИТНТ-2024);

Одиннадцатая международная научно-техническая конференция Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования земли АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Всероссийская конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий»;

Совместная III Отраслевая научно-практическая конференция "Созвездие Роскосмоса: траектория науки" и VIII Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космической техники" (VIII Козловские чтения).

На разработанное программное обеспечение получены свидетельства:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614620. Программа Constellation modeler (ConMod) для моделирования целевого функционирования космической системы мониторинга / В.В. Салмин, В.И. Куренков, И.В. Кауров, А.В. Крестина, М.А. Иванушкин, И.С. Ткаченко,

С.Л. Сафронов – Заявка №2022686687. Дата поступления 29 декабря 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 марта 2023 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612104. Программа Russian Space System Developer (RSSD) для моделирования целевого функционирования и оценки эффективности многоспутниковых космических систем различного назначения / И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов, М.А. Иванушкин, И.В. Кауров. – Заявка №2023610597. Дата поступления 17 января 2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 января 2023 г.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе: 4 статьи опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 4 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus/Web of Science; 1 монография; 1 статья, в материалах научной конференции всероссийского уровня; 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Общий объём диссертации – 191 страница, включает 19 таблиц, 72 рисунка. Список литературы содержит 86 наименований.

Глава 1. Проблема синтеза многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли с учетом структуры орбитальной группировки и наземных станций приема информации

1.1 Анализ современного состояния и тенденций развития многоспутниковых систем ДЗЗ

Последнее десятилетие характеризуется значительной трансформацией в сфере дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Отрасль перешла от использования единичных крупных многофункциональных космических аппаратов к многоспутниковым группировкам, включающим десятки и сотни малоразмерных космических аппаратов [1, 2]. Согласно анализу, приведенному в [2] более 175 разрабатываемых и запущенных многоспутниковых систем предназначены для решения задач ДЗЗ (рисунок 1.1). По данным аналитических агентств, в 2024 году было успешно запущено около 300 КА ДЗЗ [3], а суммарное количество спутников ДЗЗ на орбите превысило 1000 единиц. В период с 2024 по 2034 ожидается запуск более 5400 КА ДЗЗ, что в 2,8 раз больше, чем в прошлое десятилетие [4].

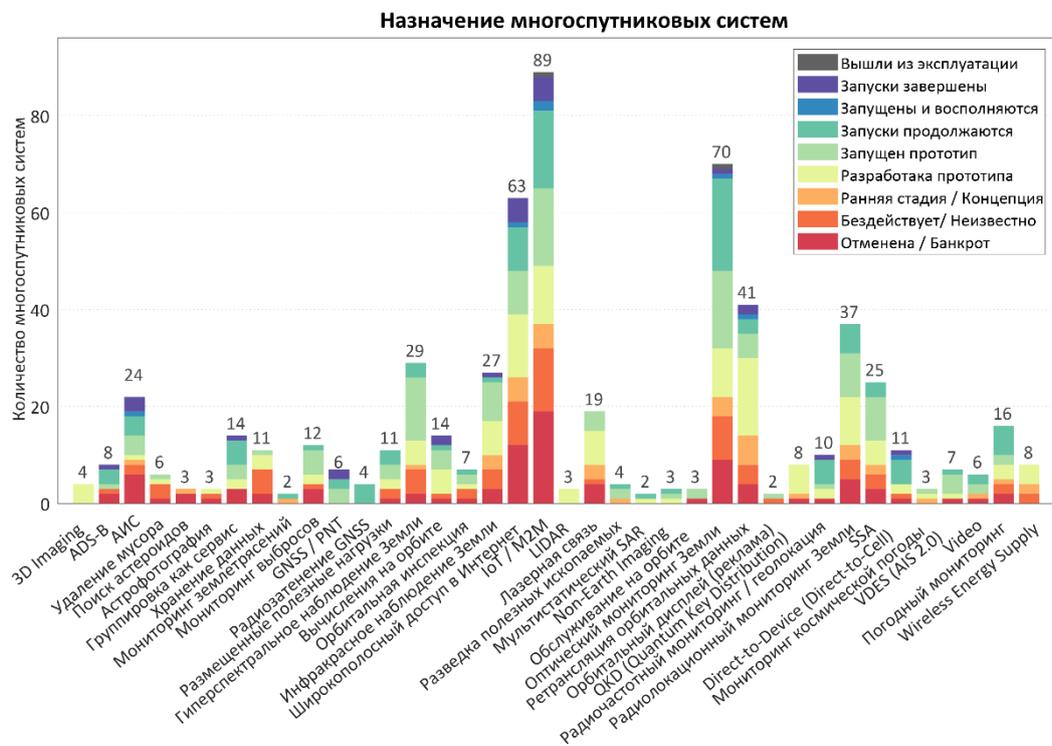


Рисунок 1.1 – Обзор разрабатываемых и запущенных многоспутниковых систем по назначению [2]

Ключевыми технологическими факторами, обусловившими трансформацию ракетно-космической отрасли, являются достижения в области миниатюризации космической техники, позволившие значительно уменьшить массогабаритные характеристики полезной нагрузки и бортовых обеспечивающих систем при одновременном улучшении их функциональных возможностей [5, 6]. Широкое распространение стандартизированных платформ, таких как CubeSat, и унифицированных компонентов существенно снизило временные и финансовые затраты на разработку низкоорбитальных космических аппаратов, а появление новых ракет-носителей и развитие рынка попутных запусков привело к снижению удельной стоимости выведения полезной нагрузки на орбиту [5, 7]. На рисунках ниже показана статистика наиболее распространённых типов орбит, на которых используются многоспутниковые системы (1.2 а), и формфакторов космических аппаратов, на базе которых строятся многоспутниковые системы (1.2 б).

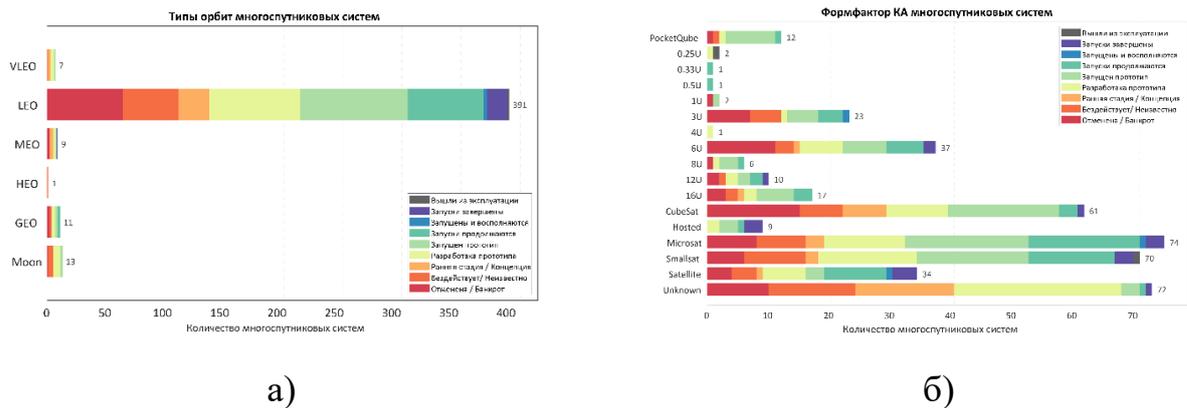


Рисунок 1.2 – Статистика наиболее распространённых типов орбит, и формфакторов космических аппаратов многоспутниковых космических систем [2]

Переход к многоспутниковым группировкам обеспечивает ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными космическими системами. Повышение периодичности наблюдения достигается за счёт увеличения количества космических аппаратов в группировке, что позволяет сократить временной интервал между последовательными наблюдениями одной и той же территории с нескольких дней до нескольких часов или минут. Улучшение оперативности доставки данных обеспечивается как возрастанием числа спутников, так и развитием распределённой наземной инфраструктуры. Типовая

структурная схема многоспутниковой космической системы дистанционного зондирования Земли показана на рисунке 1.3 [8].

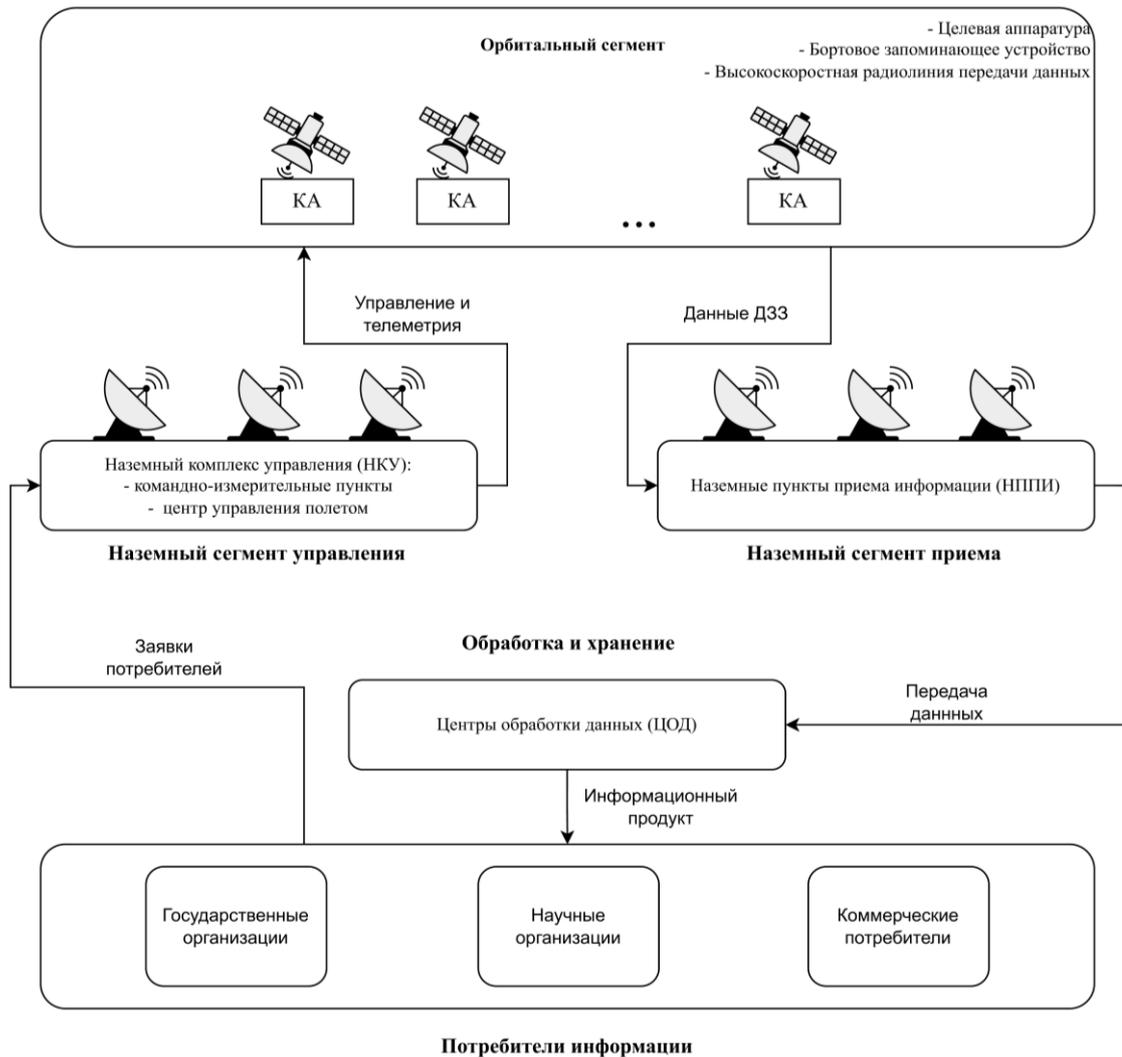


Рисунок 1.3 – Типовая архитектура многоспутниковой космической системы дистанционного зондирования Земли

Таким образом, переход от парадигмы единичных крупных космических аппаратов к распределённым многоспутниковым группировкам, обеспечивает принципиально новые возможности по периодичности наблюдения, оперативности получения данных и гибкости применения, что создаёт новые вызовы в области проектирования, управления и оценки эффективности функционирования таких систем, что определяет актуальность настоящего исследования.

1.1.1 Характеристики известных многоспутниковых систем оптического и радиолокационного мониторинга

Современный рынок космических систем дистанционного зондирования Земли представлен значительным количеством операторов, эксплуатирующих многоспутниковые группировки различной конфигурации и назначения. Анализ характеристик наиболее значимых систем позволяет выявить типичные технические решения и тенденции развития отрасли.

Среди коммерческих операторов оптико-электронных систем особое место занимает компания Planet Labs (США), реализовавшая одну из первых масштабных многоспутниковых группировок малых космических аппаратов для ежедневного глобального мониторинга земной поверхности [9-11]. По состоянию на 2024 год группировка Planet включает около 200 спутников серии Dove (SuperDove) формата 3U CubeSat, обеспечивающих пространственное разрешение 3-5 м в восьми спектральных каналах при полосе захвата около 24 км, а также 21 спутник серии SkySat с разрешением до 50 см в панхроматическом режиме и до 1 м в мультиспектральном режиме. Группировка обеспечивает ежедневное покрытие всей поверхности суши Земли и производит свыше 3 миллионов снимков в сутки.

Компания BlackSky (США) эксплуатирует группировку из 14 малых оптико-электронных спутников, обеспечивающих разрешение до 1 м в мультиспектральном режиме [12]. Система ориентирована на оперативное наблюдение и мониторинг изменений с частотой повторной съёмки до 15 раз в сутки для ключевых регионов.

Оператор Maxar Technologies (США) эксплуатирует группировку спутников сверхвысокого разрешения WorldView [13], включающую аппараты WorldView-2 и WorldView-3 с разрешением до 0,31 м в панхроматическом режиме, а также серию WorldView Legion из шести новых спутников. Группировка способна обеспечить съёмку любой точки Земли с частотой до нескольких раз в день.

Европейский оператор Airbus Defence and Space эксплуатирует группировку спутников Pleiades и SPOT [14, 15], включающую четыре спутника Pleiades Neo с разрешением 0,3 м в панхроматическом режиме и 1,2 м в мультиспектральном

режиме, а также два спутника SPOT-6/7 среднего разрешения (1,5 м в панхроматическом режиме) с полосой захвата 60 км.

Государственные космические системы дистанционного зондирования также активно развиваются. Европейское космическое агентство (ESA) эксплуатирует группировку Sentinel в рамках программы Copernicus, включающую как радарные, так и оптические космические аппараты. Система Sentinel-1 [16] состоит из двух радиолокационных спутников массой около 2280 кг, функционирующих на солнечно-синхронных орбитах высотой 693 км и работающих в С-диапазоне. Спутники обеспечивают пространственное разрешение 5×20 м в режиме Interferometric Wide Swath при полосе обзора 250 км и периодичность наблюдения 6 дней для всего земного шара и 3 дня в Арктическом регионе.

Китайская программа дистанционного зондирования Земли включает оптические группировки Gaofen и Jilin, радарную группировку Huan Jing и малые спутники Zhuhai-1. Индийская организация космических исследований (ISRO) эксплуатирует группировку спутников ДЗЗ серий IRS, Cartosat и RISAT. Национальное управление по океану и атмосфере США (NOAA) совместно с NASA развёртывает метеорологические и океанографические спутниковые системы JPSS и GOES.

Российская орбитальная группировка оптического мониторинга включает спутники серий «Ресурс-П» [17], «Канопус-В» [18], «Метеор-М» [19], «Электро-Л», Арктика-М [20], также на этапе создания находятся проекты многоспутниковых систем «СФЕРА» и многоспутниковая система ДЗЗ «Смотр» [21].

Российская орбитальная группировка радиолокационного мониторинга включает космические аппараты «Кондор-ФКА» [22], работающие в S-диапазоне и обеспечивающие разрешение до 1 м в режиме детальной съёмки, а также космические аппараты «Метеор-М», оснащённые радиолокаторами для обзорной съёмки. Планируемая к развёртыванию многоспутниковая система «Смотр-Р» будет включать космические аппараты с радиолокационной аппаратурой X-

диапазона для обеспечения всепогодного высокодетального мониторинга земной поверхности и акваторий.

В области радиолокационного мониторинга лидирующие позиции занимают компании ICEYE (Финляндия) [23] и Capella Space (США) [24]. Группировка ICEYE насчитывает более 20 спутников массой около 85 кг с радарными синтезированной апертурой X-диапазона, обеспечивающих разрешение до 0,25 м в режиме Spotlight. Космические аппараты функционируют на солнечно-синхронных орбитах высотой 570-580 км и обеспечивают периодичность наблюдения арктических районов 6-12 часов для приоритетных областей. Американская группировка Capella включает 36 малых космических аппаратов массой около 112 кг, работающих в X-диапазоне с возможностью изменения частоты в диапазоне 9,3-9,9 ГГц. Система обеспечивает пространственное разрешение 0,5-20 м и время повторного наблюдения менее 6 часов для любой точки Земли.

Канадская система RADARSAT Constellation Mission (RCM) [25], запущенная в 2019 году, представляет собой специализированную систему для арктического мониторинга, состоящую из трёх идентичных спутников массой около 1450 кг. Космические аппараты функционируют на солнечно-синхронных орбитах высотой 600 км с наклоном $97,74^\circ$ и работают в C-диапазоне (5,405 ГГц), обеспечивая пространственное разрешение от 1×3 м в режиме Spotlight до 100×100 м в режиме обнаружения судов при полосе обзора от 3 км до 500 км в зависимости от режима съёмки. Система обладает специализированными режимами Ship Detection Mode для обнаружения судов и Sea Ice Monitoring для мониторинга морского льда, что делает её особенно эффективной для мониторинга Арктического региона. Периодичность наблюдения Арктики составляет 4 дня, система поддерживает полную поляризационную съёмку (HH, VV, HV, VH), что необходимо для анализа ледовой обстановки.

Представленный обзор демонстрирует значительное разнообразие технических решений и конфигураций многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли, что отражает различные подходы к достижению требуемых

показателей функционирования в зависимости от специфики решаемых задач и доступных ресурсов.

1.1.2 Сравнительный анализ современных многоспутниковых систем ДЗЗ

Для систематизации информации о технических характеристиках современных многоспутниковых систем оптического и радиолокационного мониторинга проведён сравнительный анализ, представленный в таблицах 1.1-1.3.

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики ведущих многоспутниковых систем ДЗЗ с оптико-электронной аппаратурой

Характеристика	Planet (Dove)	Planet (SkySat)	Maxar (WorldView)	Airbus (Pleiades Neo)	BlackSky
Количество спутников (2024 г.)	~200	21	4 + 6 (новые)	4	14
Пространственное разрешение (м), панхроматический режим	-	0,5	0,31	0,3	-
Пространственное разрешение (м), мультиспектральный режим	3-5	1,0	1,24	1,2	1,0
Полоса захвата (км)	24	6	13,1	14	8,3
Количество спектральных каналов	8	4	16	6	4
Периодичность наблюдения (сутки)	1	<1	<1	<1	<1
Производительность (км ² /сутки)	>200 млн	>1 млн	>3 млн	>2 млн	>0,7 млн

Анализ представленных данных позволяет выявить следующие закономерности развития современных многоспутниковых систем ДЗЗ. Наблюдается устойчивая тенденция к увеличению числа малых спутников в составе группировок, что позволяет достичь высокой периодичности наблюдения – до нескольких раз в сутки для любой точки земной поверхности. При этом коммерческие операторы, такие как Planet Labs, делают акцент на массовости группировки для обеспечения глобального ежедневного покрытия при умеренном пространственном разрешении, в то время как операторы систем высокого разрешения, такие как Maxar Technologies и Airbus, фокусируются на создании

группировок меньшей численности, но с высокими характеристиками пространственного разрешения.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики радиолокационных систем мониторинга

Характеристика	ICEYE	Capella Space	Sentinel-1	COSMO-SkyMed	RCM
Кол-во КА	54	15 (план 36)	2 (1A и 1C)	4 (первое поколение) + 2 второго поколения	3
Высота орбиты, км	500–600	500–600	693	620	600
Наклонение, °	~97–98 (солнечно-синхронная)	~97–98 (солнечно-синхронная)	98.18 (солнечно-синхронная)	~97–98 (солнечно-синхронная)	97.74 (солнечно-синхронная)
Разрешение, м	1–15	0.5 (Spotlight) – 20	5 (IW режим) – 40	1 (Spotlight) – 30 (ScanSAR)	1×3 (Spotlight) – 100×100
Полоса обзора, км	5–100+	~5–100	80–410	до 200	3–500
Поляризация	VV	HH, VV, HV, VH	HH, HV, VV, VH	HH, VV, HH+HV, VV+VH	HH, VV, HV, VH
Диапазон рабочих частот ПН	X-диапазон (9.6 ГГц)	X-диапазон (9.6 ГГц)	C-диапазон (5.405 ГГц)	X-диапазон (9.6 ГГц)	C-диапазон (5.405 ГГц)
Периодичность наблюдений в Арктике	6–12 часов	Несколько раз в сутки	3 дня	до 8 раз в месяц	4 дня

Таблица 1.3 – Сравнительные характеристики радиолокационных систем мониторинга России

Характеристика	Метеор-М	Кондор-ФКА
Кол-во КА	4	2
Высота орбиты, км	~830	~620
Наклонение, °	98	97-98
Разрешение, м	500-1000	1-2 (детальный прожекторный), 1-3 (детальный непрерывный), 6-12 (обзорный)
Полоса обзора, км	600	(10x10) – (30x15), (10-30) x 100, (20-100) x 100
Поляризация	VV	HH, HH/VV, VV
Диапазон рабочих частот ПН	X-диапазон (9.5-9,8 ГГц)	S-диапазон (3100-3300 МГц)
Периодичность наблюдений в Арктике	Ежедневная	не более 12-14 часов

Сравнительный анализ орбитальных параметров существующих космических систем радиолокационного мониторинга показывает (таблица 1.2), что большинство систем используют солнечно-синхронные орбиты высотой 550-700 км, что обеспечивает компромисс между разрешением, полосой обзора и временем существования на орбите.

Для мониторинга Арктики наиболее эффективными являются группировки с большим количеством спутников, обеспечивающие высокую периодичность наблюдений. При этом для мониторинга ледовой обстановки и движения судов необходимо использование режимов съёмки, применяющих горизонтальную (HH) поляризацию и HV кроссполяризацию. Таким образом для мониторинга арктического региона и Северного морского пути могут быть использованы космические аппараты аналогичные Capella Space, Sentinel-1, COSMO-SkyMed и Кондор-ФКА.

На основе анализа таблиц 1.1-1.3. можно выделить следующие основные тенденции развития современных многоспутниковых систем ДЗЗ:

1. Увеличение числа малых спутников в составе группировок, позволяющее достичь высокой периодичности наблюдения - до нескольких раз в сутки для любой точки Земли.

2. Повышение пространственного разрешения как оптико-электронных, так и радарных систем. Современные коммерческие системы обеспечивают разрешение до 30 см для оптических систем и до 25 см для радарных систем.

3. Увеличение числа спектральных каналов и расширение спектрального диапазона, что повышает информативность получаемых данных и расширяет спектр решаемых задач.

4. Рост производительности систем, выражающийся в увеличении площади съёмки и объёма получаемых данных, что требует соответствующего развития наземной инфраструктуры и систем обработки информации.

5. Интеграция различных типов данных (оптических, радарных, гиперспектральных) для комплексного решения прикладных задач.

1.1.3 Наземная инфраструктура приёма и обработки информации

Современная наземная инфраструктура космических систем ДЗЗ представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных элементов, обеспечивающих полный цикл обработки космической информации – от приёма данных с космических аппаратов до доставки готовых информационных продуктов конечным потребителям.

Наземный комплекс управления (НКУ) обеспечивает управление космическими аппаратами и включает центр управления полётами и станции командно-измерительной системы. Наземный комплекс приёма, обработки и распространения информации (НКПОР) обеспечивает получение, обработку и доведение до потребителей целевой информации ДЗЗ и включает наземные пункты приёма информации (НППИ), оснащённые антенными системами для приёма высокоскоростных потоков данных; центры обработки данных (ЦОД) с комплексами вычислительных средств для первичной и тематической обработки; центры хранения и архивирования для долговременного хранения и каталогизации данных; системы распространения данных для доставки обработанной информации конечным пользователям. На рисунке 1.4 представлена схема передачи целевой информации на наземный приемный сегмент.

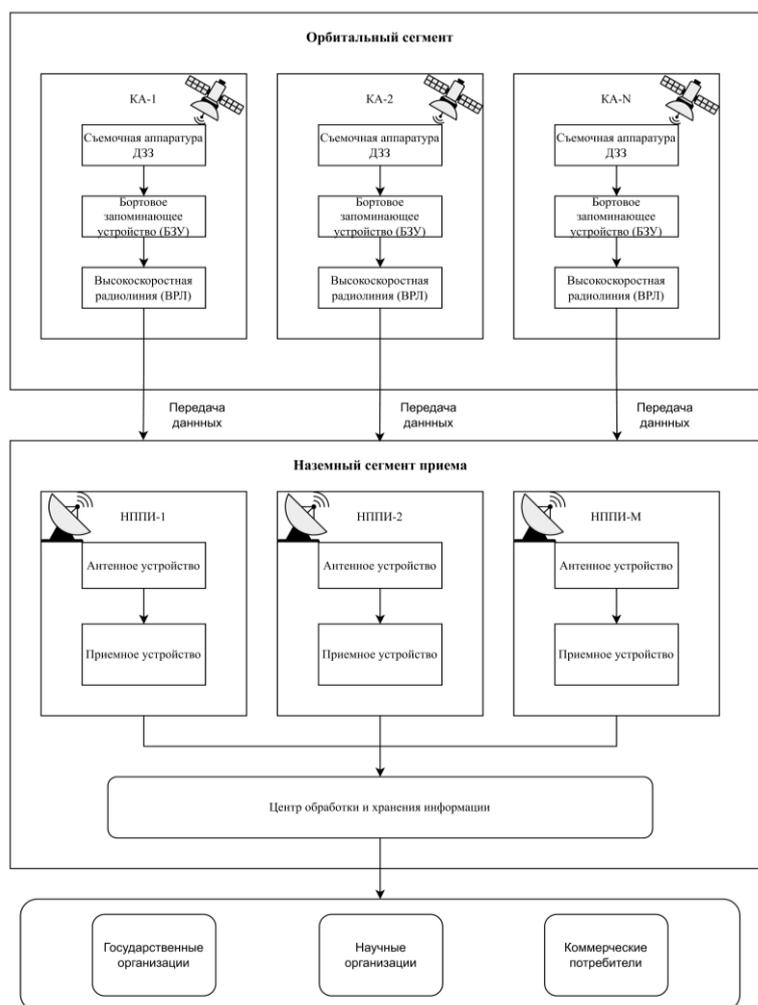


Рисунок 1.4 – Схема информационного обмена целевой информации многоспутниковой системы дистанционного зондирования Земли

В рамках данного исследования особое внимание будет уделено НППИ, как основному звену в цепочке доставки данных от спутника к конечному потребителю, определяющему оперативность получения информации и эффективность использования орбитальной группировки.

В настоящее время в мире существует несколько глобальных сетей наземных станций приёма данных ДЗЗ. Сеть Kongsberg Satellite Services (KSAT) является крупнейшей коммерческой сетью, включающей более 200 антенн на 25 станциях, обслуживающей более 100 спутников. Сеть Swedish Space Corporation (SSC) включает 15 станций в ключевых регионах мира и обеспечивает приём данных с более чем 50 спутников. Сеть станций NASA Near Earth Network (NEN) состоит из 14 станций и обслуживает научные и исследовательские спутники. Европейская сеть COPERNICUS обслуживает группировку спутников Sentinel и включает

основные станции в Испании и Италии. Российская Единая территориально-распределённая информационная система ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ) включает более 13 станций на территории России. Китайская сеть станций приёма данных ДЗЗ включает более 20 станций на территории Китая и несколько зарубежных станций в Арктике, Африке и Латинской Америке.

На рисунке 1.5 представлена схема географического распределения известных наземных станций приёма данных ДЗЗ в мире.



Рисунок 1.5 – Географическое распределение известных наземных станций приёма данных ДЗЗ

Анализ географического распределения наземных станций показывает, что особое внимание уделяется размещению станций в приполярных регионах (Свальбард, Аляска, Антарктида), где спутники на полярных и солнечно-синхронных орбитах проходят над полюсами при каждом витке, что позволяет обеспечить приём данных практически на каждом витке орбиты. Станция на Свальбарде ($78,9^\circ$ северной широты) обеспечивает видимость космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах высотой 500-800 км при каждом витке, что делает её критически важным элементом глобальной инфраструктуры приёма данных. Большая часть наземных станций располагается в районах с благоприятными климатическими условиями и развитой телекоммуникационной инфраструктурой. Выбор мест для станций часто ограничивается политико-

экономическими факторами, что не позволяет реализовать технически оптимальное расположение.

Основными техническими характеристиками наземных станций приёма данных, определяющими их эффективность, являются пропускная способность каналов связи, время видимости космических аппаратов и минимальный угол возвышения. Современные станции X-диапазона (7-8 ГГц для нисходящей линии связи) обеспечивают пропускную способность до 1200 Мбит/с, что позволяет принять за типичный сеанс связи длительностью 10 минут около 90 Гбит информации. Перспективные станции Ka-диапазона (25-27 ГГц) обеспечивают пропускную способность до 3600 Мбит/с, что втрое увеличивает объём принимаемой информации за сеанс. Время видимости низкоорбитального спутника с наземной станции составляет от 5 до 15 минут на один проход в зависимости от высоты орбиты и минимального угла возвышения. Минимальный угол возвышения, при котором возможен устойчивый приём данных, обычно составляет 5-10 градусов и ограничен рельефом местности, городской застройкой и уровнем радиопомех.

Существенными факторами, ограничивающими развитие и эффективное использование наземной инфраструктуры космических систем ДЗЗ, согласно [26, 27], являются следующие. В [26] показано, что достигнутый к настоящему времени уровень доступности средств наземного комплекса приёма, обработки и распространения информации (НКПОР) для приёма космической информации является основным сдерживающим фактором при решении проблемы повышения оперативности глобального мониторинга поверхности Земли путём увеличения количества космических аппаратов. Авторами проведены расчёты, показывающие, что для многоспутниковой группировки из 56 космических аппаратов на солнечно-синхронных орбитах высотой 670 км время ожидания сброса данных на станции НКПОР составляет 30,9 минут и формирует 56% от общего времени выполнения целевых задач, что существенно ограничивает оперативность системы в целом.

В [27] авторы выявили, что современная сеть наземных станций Европейского космического агентства не справляется с оперативным приёмом

данных от космических аппаратов ДЗЗ программы Copernicus, генерирующих 6 терабайт информации в сутки, что потребовало создания системы European Data Relay System (EDRS) на основе геостационарных спутников-ретрансляторов с пропускной способностью до 50 терабайт в сутки. Авторы отмечают географические ограничения, связанные с необходимостью размещения станций приёма в полярных регионах для обеспечения частого контакта с космическими аппаратами на полярных и солнечно-синхронных орбитах, а также сложность интеграции различных геоинформационных систем, использующих различные методы доведения целевой информации до потребителя.

Данные ограничения создают объективный дисбаланс между быстро растущими возможностями орбитальных группировок по сбору данных и возможностями наземной инфраструктуры по их приёму и обработке, что требует разработки методик оптимизации орбитальной и наземной составляющих космической системы на этапе проектирования.

1.2 Оценка эффективности функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли

Методы анализа, синтеза и оценки эффективности космических систем наблюдения наиболее полно изложены в работах [28-32]. Также следует отметить теоретические и прикладные результаты в области проектирования космических систем мониторинга [33-37]. Методы орбитального построения спутниковых систем глобального обзора изложены в работах [38-57].

В ГОСТ Р 70665-2023 [58] эффективность многоспутниковых систем ДЗЗ определяется как соотношение между объёмом целевого эффекта от полученных данных дистанционного зондирования Земли из космоса, соответствующих установленным требованиям, и суммой затрат на создание и эксплуатацию космической системы дистанционного зондирования Земли.

Эффективность КС ДЗЗ следует оценивать на следующих уровнях декомпозиции:

- системном (в качестве степени достижения прямого и косвенного целевых эффектов КС ДЗЗ);

- функциональном (в качестве степени реализации функциональных задач на каждом этапе целевого применения КС ДЗЗ);

- техническом (в качестве степени достижения технического уровня составных компонентов КС ДЗЗ).

Согласно [59] каждому уровню декомпозиции соответствуют собственные показатели эффективности.

Показатели эффективности системного уровня декомпозиции:

- суммарное время обслуживания заявок;
- эффективная производительность системы (суммарная относительная площадь, выданная потребителям);
- совокупная ценность продуктов обработки отснятых маршрутов;
- осредненная оперативность исполнения заявок;
- суммарный объем архивов наземного комплекса приема, обработки и распространения (НКПОР) и др

Показатели эффективности функционального уровня декомпозиции:

- вероятности обслуживания заявок в зависимости от приоритета;
- вероятности отказа в обслуживании заявок в зависимости от приоритета;
- оперативность исполнения заявок в зависимости от приоритета;
- глубина обработки отснятых маршрутов в зависимости от приоритета;
- суммарная относительная площадь, выданная потребителям, в зависимости от приоритета и др.

Показатели технического уровня декомпозиции:

- разрешение обработанных снимков;
- точность плановой привязки обработанных снимков;
- суммарный объем информации, полученной на НКПОР;
- суммарная отснятая площадь (производительность системы) и др.

Показатели эффективности многоспутниковых систем ДЗЗ зависят от баллистической структуры орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и наземного комплекса приема обработки и распределения информации. В настоящей работе для начальных этапов синтеза и анализа

космических систем ДЗЗ предлагается рассматривать три показателя эффективности: периодичность наблюдения, оперативность доставки информации и процент покрытия заданной зоны интереса. Таким образом, показатели периодичности наблюдения и процента покрытия поверхности Земли позволят сделать вывод о соответствии баллистической структуры космической системы требованиям, оперативность доставки – о соответствии наземной инфраструктуры (скорость канала, количество и расположения станций) информационному потоку, создаваемому целевой аппаратурой многоспутниковой системы ДЗЗ.

Методики оценки периодичности наблюдения можно разделить на аналитические и имитационные [60, 61].

Аналитические методики основаны на расчёте параметров орбитального движения космических аппаратов и определении моментов пересечения трассы полёта с заданным районом наблюдения.

Имитационные методики основаны на моделировании движения космических аппаратов и процессов наблюдения с учётом реальных условий функционирования системы. Эти методики обеспечивают более реалистичную оценку периодичности наблюдения, но требуют значительных вычислительных ресурсов.

В работе [62] изложен подход к оценке периодичности наблюдения, основанный на имитационном моделировании с учётом ограничений и использованием методов пространственно-временного анализа. Периодичность наблюдения определяется как:

$$T_{per} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (t_{i+1} - t_i)$$

где T_{per} – средняя периодичность наблюдения; N – количество наблюдений заданной точки или района; t_i – момент времени i -го наблюдения.

При этом для каждого конкретного района можно вычислить характеристики распределения периодичности наблюдения: минимальную, максимальную и среднюю периодичность, а также стандартное отклонение, что позволяет оценить возможности системы по регулярному наблюдению заданной территории.

Оперативность доставки данных характеризует временной интервал от момента съёмки до момента доступности данных для конечного пользователя.

Общая оперативность доставки данных (T_{op}) может быть представлена как сумма следующих временных интервалов [42]:

$$T_{op} = T_{acq} + T_{down} + T_{proc} + T_{del}$$

где T_{acq} – время ожидания съёмки; T_{down} – время ожидания сброса данных на наземную станцию; T_{proc} – время обработки данных; T_{del} – время доставки данных конечному пользователю.

Время ожидания съёмки T_{acq} зависит от параметров орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и условий проведения съёмки. Время ожидания сброса данных T_{down} определяется географическим расположением наземных станций и параметрами орбитального движения. Для систем с возможностью распределения потоков данных между спутниками время ожидания сброса данных может быть существенно сокращено.

Существующие методики оценки эффективности космических систем ДЗЗ, разработанные в работах [38-57], в основном сфокусированы на характеристиках орбитальной группировки и не учитывают в достаточной мере влияние параметров наземной инфраструктуры на комплексную эффективность системы. При этом показатели эффективности, определённые в ГОСТ Р 70665-2023 [58] и работах [28-33], рассматривают систему в целом, однако не предлагают конкретных методик их расчёта с учётом взаимодействия орбитальной и наземной составляющих.

В цикле работ [59, 63, 64] представлена методология управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ. В первой части [59] проведена декомпозиция космической системы ДЗЗ как сложной информационной организационно-технической системы, определены системные и потребительские характеристики её элементов, обоснована возможность свёртывания системных показателей эффективности к двум частным показателям: оперативности выполнения заявок потребителей и стоимости готового тематического продукта. Во второй части [63] представлены математические модели орбитальной

группировки, включающие модели эволюции орбиты космического аппарата, модели прогноза интервалов коррекции орбиты, модели прогноза интервалов работы целевой аппаратуры и интервалов сброса данных на наземные пункты приёма. В третьей части [64] описана архитектура и порядок применения программного комплекса, реализующего предложенную методологию. Авторы рассматривают задачу оптимального распределения процессов обработки заявок потребителей по элементам космической системы с учётом ограничений на ресурсы орбитального и наземного сегментов. Однако в данных работах наземная инфраструктура рассматривается как заданная, а оптимизация направлена на распределение потоков информации по существующим элементам системы. При этом не решается задача выбора оптимального расположения и минимально необходимого количества наземных станций приёма на этапе проектирования космической системы. Модели предполагают, что конфигурация наземных пунктов приёма (их количество, географическое расположение, характеристики каналов связи) определена заранее, что не позволяет использовать данный подход для комплексной оптимизации системы с учётом взаимного влияния параметров орбитальной группировки и наземной инфраструктуры на этапе проектирования.

Анализ рассмотренных работ показывает, что существующие методики оценки эффективности функционирования малых космических аппаратов и их группировок в основном сфокусированы на характеристиках отдельных космических аппаратов и не обеспечивают масштабируемость на группировки большой численности (более 100 космических аппаратов). При этом отсутствуют методики, позволяющие на этапе проектирования оценивать эффективность системы с учётом совместного влияния параметров орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и конфигурации наземной инфраструктуры. Отсутствуют масштабируемые агрегированные модели, позволяющие на этапе проектирования оценивать целевые показатели функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, включающих до двухсот космических аппаратов и произвольное количество наземных станций.

Эффективность функционирования многоспутниковых систем ДЗЗ в значительной степени определяется алгоритмами планирования передачи данных с космических аппаратов на наземные станции приёма, а также методиками выбора расположения самих наземных станций. Данные задачи являются взаимосвязанными, но в литературе традиционно рассматриваются отдельно.

1.2.1 Алгоритмы планирования передачи данных

Павлов и др. [65] разработали алгоритмы планирования передачи данных от космических аппаратов на наземные станции для перспективной системы из 200 космических аппаратов и 14 наземных станций. Авторы рассмотрели постановку задачи с учётом следующих ограничений: космический аппарат в каждый момент времени может либо осуществлять съёмку земной поверхности, либо передавать данные на станцию, но не может выполнять обе операции одновременно; станция не может одновременно принимать данные с двух и более спутников; спутник не может одновременно передавать данные на две и более станций. Предложены два алгоритма: жадный алгоритм, основанный на приоритизации космических аппаратов, и точный алгоритм на сегменте с использованием решателя CP-SAT. Экспериментальные исследования показали, что точный алгоритм обеспечивает увеличение объёма переданных данных на 7% по сравнению с жадным алгоритмом при увеличении времени вычислений с 1 до 20 минут.

Балухто [66] предложил технологию мультиагентного управления маршрутизацией данных в многоспутниковых сетевых системах ДЗЗ. Разработаны алгоритмы динамической маршрутизации данных с учётом изменяющейся топологии сети межспутниковых связей. Использование мультиагентного подхода позволяет обеспечить адаптивность системы передачи данных и повысить её устойчивость к изменениям конфигурации группировки, возникающим вследствие отказов космических аппаратов или изменения режимов их функционирования.

В работе [67] авторы предложили модель и алгоритм оптимизации планирования использования объектов наземных станций китайской сети дистанционного зондирования Земли (RSGS). Разработана математическая модель, учитывающая распределение ограниченных ресурсов станций (антенн,

демодуляторов, рекордеров) между множеством спутниковых миссий. Предложен трёхступенчатый алгоритм декомпозиции, включающий оптимизацию на основе метода роя частиц и смешанного целочисленного линейного программирования для задач распределения объектов отдельных станций.

Jiang и др. [68] предложили стратегию распределения каналов связи для спутниковых группировок на основе системы с несколькими наземными станциями. Разработана стратегия временной вставки слотов, направленная на минимизацию временных зазоров между сеансами связи. Исследования на группировке из 1152 космических аппаратов и 40 наземных станций показали существенное улучшение показателей: максимальный временной зазор между сеансами сокращён более чем в 500 раз (с 2,5 часов до 18 секунд), средний временной зазор между станциями уменьшен в 7-17 раз, время установления связи спутник-земля увеличено на 20-30%.

1.2.2 Алгоритмы размещения наземных станций

Задача оптимального размещения наземных станций приёма данных является критически важной для обеспечения эффективного функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ, однако в литературе данная задача проработана в меньшей степени по сравнению с задачами планирования использования станций.

Eddy и др. [69] разработали метод оптимального выбора наземных станций для низкоорбитальных спутников, сформулировав задачу как задачу целочисленного программирования. Авторы рассмотрели три различные целевые функции: минимизация стоимости миссии, максимизация объёма передаваемых данных, минимизация максимального временного разрыва между сеансами связи. Метод предполагает выбор оптимальных поставщиков услуг наземных станций и конкретных мест расположения станций из фиксированного набора. В исследовании рассматривалась выборка из 91 станции от шести коммерческих операторов НППИ. Важным ограничением метода является то, что выбор осуществляется из заранее определённого множества расположений станций, а не из произвольных географических координат.

В [70] авторы разработали многокритериальный подход к определению параметров наземного сегмента для негеостационарных спутниковых группировок. Авторы предложили методологию на основе последовательной фильтрации географической сетки по нескольким критериям. Методология применена для определения расположения станций в Европе: из 175851 потенциальной точки на сетке после применения всех фильтров было определено шесть районов с высокой плотностью подходящих позиций, для каждого из которых выбрана одна станция на основе географического центра кластера. Авторы отмечают, что их подход не является формальной оптимизацией, а представляет собой эвристическую процедуру отбора, результаты которой могут служить ориентиром для будущих оптимизационных алгоритмов.

Анализ рассмотренных работ показывает, что существующие исследования алгоритмов размещения наземных станций имеют следующие ограничения. Метод, представленный в [69] осуществляет выбор из фиксированного множества существующих станций коммерческих операторов, что ограничивает возможности оптимизации и не позволяет определить технически оптимальное расположение станций с учётом специфики конкретной орбитальной группировки. Методология [70] позволяет определять расположение станций на основе множественных критериев, однако не включает формальную оптимизацию и не гарантирует минимизацию количества необходимых станций. Таким образом, рассмотренные методы не учитывают ограничения на непересечение временных интервалов радиовидимости различных космических аппаратов одной и той же станцией. При определении расположения станций в работе [70] используется показатель среднего количества видимых спутников, что не учитывает возможность одновременной видимости нескольких космических аппаратов и возникающие при этом конфликты при планировании сеансов связи. Аналогично, в работе [69] при формулировке ограничений учитывается невозможность одновременного обслуживания нескольких космических аппаратов, однако данное ограничение не используется при выборе самих станций, что может приводить к завышенным оценкам пропускной способности системы.

Также следует отметить, что работы [67] и [71] сфокусированы на оптимизации использования уже развёрнутой инфраструктуры, решая задачи составления расписаний сеансов связи, а не задачи определения оптимального расположения новых станций. Авторы [67] рассматривают оптимизацию распределения объектов существующей китайской сети RSGS между спутниковыми миссиями. Авторы в [71] предложили распределённую гибридную архитектуру наземной сети, в которой большинство станций выполняют только функции приёма данных, а меньшая часть станций дополнительно обеспечивает передачу команд управления. Исследования на существующей сети SatNOGS, включающей 173 станции, показали сокращение средней времени доставки данных с 58 до 12 минут. Однако в данных работах расположение станций предполагается заданным, а оптимизация направлена на эффективное использование доступных ресурсов.

Таким образом, анализ существующих подходов к алгоритмам планирования передачи данных и размещения наземных станций показывает наличие пробела в методическом обеспечении проектирования наземной инфраструктуры многоспутниковых систем ДЗЗ. Отсутствует методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок, в которой координаты размещения станций определяются на основе оптимизационного алгоритма с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата.

Существующие методы либо осуществляют выбор из фиксированного набора станций [69], либо используют эвристические процедуры фильтрации без формальной оптимизации [70], либо фокусируются на планировании использования уже развёрнутой инфраструктуры [67, 71]. Разработка такой методики составляет одну из задач настоящего исследования.

1.3 Постановка задачи оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ с учётом информационного взаимодействия орбитального и наземного сегментов

Рассмотренные показатели эффективности функционирования космических систем ДЗЗ могут быть классифицированы по признаку их зависимости от компонентов системы. Как было отмечено, в настоящей работе рассматриваются три основных показателя: процент покрытия, периодичность наблюдения и оперативность доставки информации. Эти показатели по-разному зависят от параметров орбитального и наземного сегментов системы.

Процент покрытия заданной территории и периодичность наблюдения в первую очередь зависят от параметров орбитальной группировки $O = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$, где каждый КА характеризуется орбитальными параметрами и характеристиками целевой аппаратуры. Эти показатели позволяют оценить способность системы обеспечить требуемое пространственное и временное покрытие целевых районов наблюдения.

Оперативность доставки информации T_{delivery} является интегральным показателем, зависящим как от параметров орбитальной группировки, так и от конфигурации наземной инфраструктуры $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$, где каждая станция характеризуется географическими координатами и параметрами приемного оборудования.

Таким образом, комплексная оценка показателей функционирования многоспутниковой системы ДЗЗ требует учёта взаимосвязи между орбитальным и наземным сегментами. Периодичность наблюдения и процент покрытия определяют требования к орбитальной группировке, в то время как оперативность доставки характеризует согласованность наземной инфраструктуры с информационным потоком, генерируемым целевой аппаратурой КА. Эта взаимосвязь определяет необходимость системного подхода к постановке задачи оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ, рассматриваемого в следующем разделе.

1.3.1 Декомпозиция многоспутниковой космической системы ДЗЗ

Эффективность функционирования многоспутниковой космической системы дистанционного зондирования Земли определяется способностью своевременно доставлять требуемые объемы информации ДЗЗ заданного качества пользователю. Этот процесс обеспечивается информационным взаимодействием между орбитальной группировкой и наземным сегментом, что служит основой для декомпозиции комплексной задачи синтеза системы.

Многоспутниковая система ДЗЗ представляется как $Z = (O, G)$, где O – орбитальная группировка, G – наземная инфраструктура. Каждый из этих компонентов характеризуется набором параметров, определяющих его функциональные возможности.

Орбитальная группировка $O = \{o_1, o_2, \dots, o_N\}$ состоит из N космических аппаратов. В рамках типовой группировки все КА имеют одинаковые характеристики и могут быть описаны следующими параметрами: h – высота орбиты; i – наклонение орбиты; Ω_j, M_j – долгота восходящего узла и средняя аномалия для j -го КА; P – количество орбитальных плоскостей; характеристики целевой аппаратуры (зона обзора, разрешение, спектральные каналы); R_{imaging} – скорость генерации данных целевой аппаратурой; V_{memory} – ёмкость бортового запоминающего устройства; R_{downlink} – скорость передачи данных по радиоканалу.

Наземная инфраструктура $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$ включает M наземных станций приёма информации (НППИ). Каждая станция g_j характеризуется параметрами: $\text{lat}_j, \text{lon}_j$ – географические координаты станции; R_j^{min} – минимальный угол возвышения для радиовидимости; R_j^{recv} – скорость приёма информации.

На рисунке 1.6 представлена структурная схема декомпозиции многоспутниковой космической системы ДЗЗ с указанием связей между компонентами.



Рисунок 1.6 – Декомпозиция многоспутниковой космической системы ДЗЗ на орбитальный и наземный сегменты с указанием параметров и связей

Связь между орбитальной группировкой и наземной инфраструктурой осуществляется через функцию радиовидимости $V: O \times G \times T \rightarrow \{0,1\}$, которая определяет возможность передачи данных с КА o_i на станцию g_j в момент времени t . Информационный поток от КА к наземной станции описывается функцией $D: O \times G \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$, определяющей объём данных, передаваемых в единицу времени.

1.3.2 Постановка задачи

В наиболее общей постановке задача оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ формулируется следующим образом:

Найти: $Z^* = (O^*, G^*)$

Критерий: $\min \{ \bar{T}_{\text{delivery}}(O, G) \}$, где $\bar{T}_{\text{delivery}}$ — средняя оперативность доставки информации от момента съёмки до получения данных на наземной станции.

При ограничениях:

- процент покрытия заданной территории не менее требуемого;
- периодичность наблюдения не более требуемой;

- количество КА: $N \leq N_{\max}$;
- количество наземных станций: $M \leq M_{\max}$;
- стоимость системы: $C(O, G) \leq C_{\max}$.

Данная постановка соответствует задаче совместной оптимизации, в которой параметры обоих сегментов варьируются одновременно. Однако размерность такой задачи делает её практически неразрешимой для многоспутниковых группировок большой численности. Поэтому предлагается декомпозировать общую задачу на последовательность взаимосвязанных подзадач меньшей размерности.

1) Задача оптимизации орбитальной группировки

На первом этапе решается задача определения параметров орбитальной группировки при заданных требованиях к покрытию и периодичности наблюдения:

Дано: Требования к проценту покрытия и периодичности наблюдения

Найти: $O^* = \{o_1^*, o_2^*, \dots, o_N^*\}$.

Критерий: $\min N$ (минимизация количества КА):

$$O^* = \arg \min \left\{ |O^*| : E_{\text{cov}} \geq E_{\text{cov}}^{\min}, T_{\text{obs}} \leq T_{\text{obs}}^{\text{req}} \right\}.$$

При ограничениях:

- процент покрытия заданной территории (E_{cov}) не менее требуемого;
- периодичность наблюдения (T_{obs}) не более требуемой.

Выход: конфигурация орбитальной группировки O^* , определяющая информационный поток $I(t)$, генерируемый целевой аппаратурой.

Критерий минимизации количества КА связан с минимизацией затрат на создание и запуск орбитального сегмента. После решения этой задачи становится известным пространственно-временное распределение информационного потока, который должен быть принят наземными станциями.

2) Задача оптимизации наземного сегмента

При известной конфигурации орбитальной группировки, решается задача определения минимально необходимого количества и оптимального расположения наземных станций.

Дано: орбитальная группировка O^* , генерирующая информационный поток целевой информации ДЗЗ $I(t)$ и географический полигон P , внутри которого может располагаться множество потенциальных местоположений наземных станций.

Требуется найти: $G^* = \{g_1^*, g_2^*, \dots, g_M^*\}$.

Критерий: $\min M$ (минимизация количества наземных станций).

При этом подмножество $G^* \subseteq P$ местоположений станций такое, чтобы минимизировать количество используемых станций $|G^*|$ при обеспечении заданного уровня обслуживания орбитальной группировки:

$$F = \min \left\{ |G^*| : G^* \subseteq P, T_{req} \geq T_{req}^{\min} \right\},$$

где G^* – подмножество выбранных местоположений станций, принадлежащих заданному географическому полигону с учетом ограничений:

$$G^* = \{g \in G \mid lat_{min}^{th} \leq lat_g \leq lat_{max}^{th}, g \in P\}.$$

При основном ограничении: пропускная способность наземных станций должна обеспечивать своевременный приём всех данных, генерируемых орбитальной группировкой.

Формально это ограничение может быть записано следующим образом: для каждого суточного интервала k объём данных, которые могут быть переданы на наземные станции, должен быть не менее объёма данных, накопленных на бортовых запоминающих устройствах КА:

$$\forall k : \sum_{j=1}^M R_j^{\text{recv}} \cdot \tau_{\text{сеанс},j,k} \geq V_{\text{накопл},k}$$

где $\tau_{\text{сеанс},j,k}$ – суммарное время сеансов связи с j -й станцией для данных, накопленных за k -й интервал; $V_{\text{накопл},k}$ – объём накопленных данных.

Иначе данное ограничение может быть сформулировано, как требование ко времени передачи данных. Общая продолжительность сеансов связи должна быть не менее требуемого времени для передачи данных, накопленных КС:

$$T_{req} \geq T_{req}^{\min},$$

где $T_{req} = \frac{D_{\text{daily}}}{R_{\text{data}}}$ – общая продолжительность сеансов связи, требуемая для передачи данных КС, а D_{daily} – суточный объем целевой информации; R_{data} – скорость передачи целевой информации.

Если для найденной конфигурации орбитальной группировки O^* не существует допустимого решения задачи оптимизации наземного сегмента (например, географические ограничения на размещение НППИ делают невозможным приём всех данных без переполнения бортовой памяти), решение признаётся нереализуемым. В этом случае требуется корректировка параметров орбитальной группировки: изменение скорости генерации данных (за счёт изменения режимов съёмки), увеличение ёмкости бортовой памяти или изменение конфигурации группировки.

На рисунке 1.7 представлена блок-схема иерархического процесса оптимизации с указанием связей между задачами и механизма обратной связи.

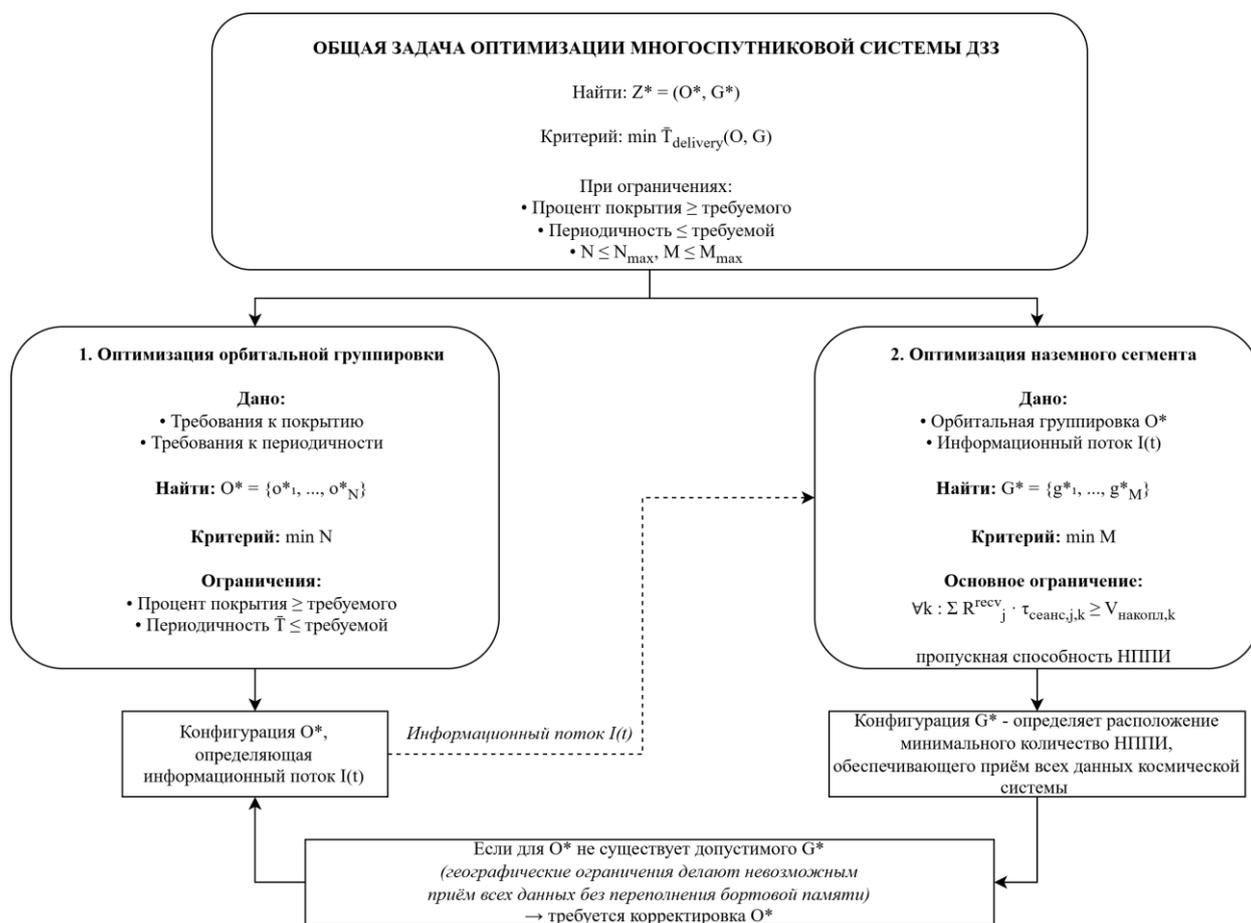


Рисунок 1.7 – Иерархия задач оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ с указанием критериев и ограничений

Таким образом показатели функционирования служат для оценки качества функционирования системы и используются как ограничения в задачах оптимизации:

- процент покрытия и периодичность наблюдения характеризуют только орбитальный сегмент;
- средняя оперативность доставки $\bar{T}_{\text{delivery}}$ является интегральным показателем, характеризующим систему в целом.

Критерии оптимальности определяют направление поиска оптимального решения:

- на системном уровне: минимизация средней оперативности доставки информации;
- на уровне орбитального сегмента: минимизация количества КА при обеспечении требуемых показателей покрытия и периодичности;

– на уровне наземного сегмента: минимизация количества НППИ при обеспечении требуемой пропускной способности.

Таким образом, в рамках предложенной декомпозиции глобальный критерий ($\bar{T}_{\text{delivery}}$) служит конечной мерой качества функционирования системы, а частные критерии (N, M) являются целевыми функциями на соответствующих этапах синтеза, косвенно связанными с минимизацией стоимости системы.

При этом не учитывается возможность динамического перепланирования задач съёмки в зависимости от доступности наземных станций и состояния бортовой памяти. Перспективные системы с развитым бортовым планированием могут адаптивно изменять режимы работы для оптимизации использования ресурсов.

Минимизация количества КА и количества НППИ рассматриваются как независимые критерии, связанные с минимизацией затрат на соответствующие сегменты. В действительности может существовать экономически выгодный компромисс между более дорогой орбитальной группировкой с меньшей скоростью генерации данных и более дешёвой наземной инфраструктурой, и наоборот.

1.4 Выводы по первой главе

Проведённый обзор современного состояния многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли, методов и подходов к оценке показателей их функционирования, а также организации информационного взаимодействия между элементами системы позволяет сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

Цель работы:

Разработка методики оценки показателей функционирования многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли, учитывающей информационное взаимодействие орбитальной группировки и наземных станций приёма.

Для достижения поставленной цели в диссертации определены следующие задачи исследования:

1. Разработка методики выбора оптимального расположения наземных станций приёма информации необходимых для низкоорбитальной многоспутниковой группировки с учётом динамики орбитального движения и информационных потоков, формируемых космической системой.

2. Разработка масштабируемой имитационной модели для оценки ключевых показателей функционирования космических систем ДЗЗ, включающих низкоорбитальные многоспутниковые группировки и наземные станции приема, учитывающую параметры орбитальной группировки, характеристики полезной нагрузки, параметры наземной инфраструктуры и информационного взаимодействия между элементами системы.

3. Разработка программного комплекса для моделирования функционирования низкоорбитальных космических систем, позволяющего проводить многовариантные исследования эффективности функционирования данных систем.

4. Апробация разработанной методики и программного комплекса на примере решения двух практических задач по оценке целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, обеспечивающих глобальный высокодетальный мониторинг земной поверхности, а также космических систем, предназначенных для мониторинга Арктики и Северного морского пути.

Глава 2. Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли

Настоящая глава диссертационного исследования посвящена разработке методики оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли.

2.1 Описание методики

Методика оценки показателей функционирования космических систем, включающих низкоорбитальные многоспутниковые группировки и наземные станции приема, необходима для формирования целостного представления о системе и принятия обоснованных решений по оптимизации её параметров.

Предлагаемая методика основывается на имитационном динамическом моделировании и учитывает параметры построения орбитальной группировки, параметры целевой аппаратуры наблюдения, бортового запоминающего устройства и высокоскоростной радиолинии космических аппаратов, а также расположение наземных станций приёма. Методика позволяет проводить комплексную оценку покрытия заданных зон интереса, периодичности наблюдения, оперативности доставки информации, загрузки наземных станций приёма на этапах проектирования и эксплуатации космических систем.

2.1.1 Формализация связей между компонентами космической системы

Предлагаемая методика оценки показателей функционирования многоспутниковой системы ДЗЗ основывается на системном подходе, который предполагает рассмотрение космической системы ДЗЗ как единого целого, функционирующего в определённой среде и взаимодействующего с другими системами [60].

Для формализации связей между компонентами многоспутниковых систем ДЗЗ используется математический аппарат теории систем и исследования операций. В соответствии с подходом, предложенным в работах [27, 31, 60], система ДЗЗ может быть представлена в виде набора взаимосвязанных моделей, каждая из которых описывает определённый аспект функционирования системы.

Пусть $Z = (O, G)$ – многоспутниковая система ДЗЗ, где: $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – орбитальная группировка, состоящая из n КА; $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ – наземная инфраструктура, включающая m станций приёма данных.

Каждый космический аппарат орбитальной группировки $o_i \in O$ характеризуется вектором параметров $p_i = (h_i, i_i, \Omega_i, \omega_i, M_i, P_i)$, где: h_i – высота орбиты; i_i – наклонение орбиты; Ω_i – долгота восходящего узла; ω_i – аргумент перигея; M_i – средняя аномалия; $P_i = (P_i^{\text{FOV}}, P_i^{\text{res}}, P_i^{\text{bands}}, P_i^{\text{data}})$ – параметры целевой аппаратуры (зона обзора, разрешение, спектральные каналы, объем генерируемых данных).

Каждая наземная станция $g_j \in G$ характеризуется вектором параметров $q_j = (\text{lat}_j, \text{lon}_j, R_j^{\text{min}}, R_j^{\text{recv}})$, где: $(\text{lat}_j, \text{lon}_j)$ – географические координаты станции; R_j^{min} – минимальный угол возвышения для радиовидимости; R_j^{recv} – скорость приёма информации.

Связь между орбитальной группировкой и наземной инфраструктурой осуществляется через функцию радиовидимости $V: O \times G \times T \rightarrow \{0, 1\}$, которая определяет, виден ли космический аппарат o_i со станции g_j в момент времени $t \in T$:

$$V(o_i, g_j, t) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta(o_i, g_j, t) \geq R_j^{\text{min}} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где $\theta(o_i, g_j, t)$ – угол возвышения КА над горизонтом станции в момент времени t .

Информационный поток от КА к наземной станции описывается функцией $D: O \times G \times T \rightarrow \mathbb{R}_+$, которая определяет объем данных, передаваемых с КА o_i на станцию g_j в момент времени t :

$$D(o_i, g_j, t) = \begin{cases} R_j^{recv}, & \text{если } V(o_i, g_j, t) = 1 \text{ и } B_i(t) > 0 \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где $B_i(t)$ – объем данных в бортовой памяти КА o_i в момент времени t .

Динамика изменения объёма данных в бортовой памяти КА o_i описывается уравнением:

$$\frac{dB_i(t)}{dt} = G_i(t) - \sum_{j=1}^m D(o_i, g_j, t)$$

где $G_i(t)$ – скорость генерации данных целевой аппаратурой КА o_i в момент времени t .

Эффективность системы ДЗЗ определяется набором показателей $E = \{E_1, E_2, \dots, E_k\}$, каждый из которых зависит от параметров орбитальной группировки и наземной инфраструктуры:

$$E_l = F_l(O, G, I), \quad l = 1, 2, \dots, k.$$

На рисунке 2.1 представлена структурная схема предлагаемой методики.

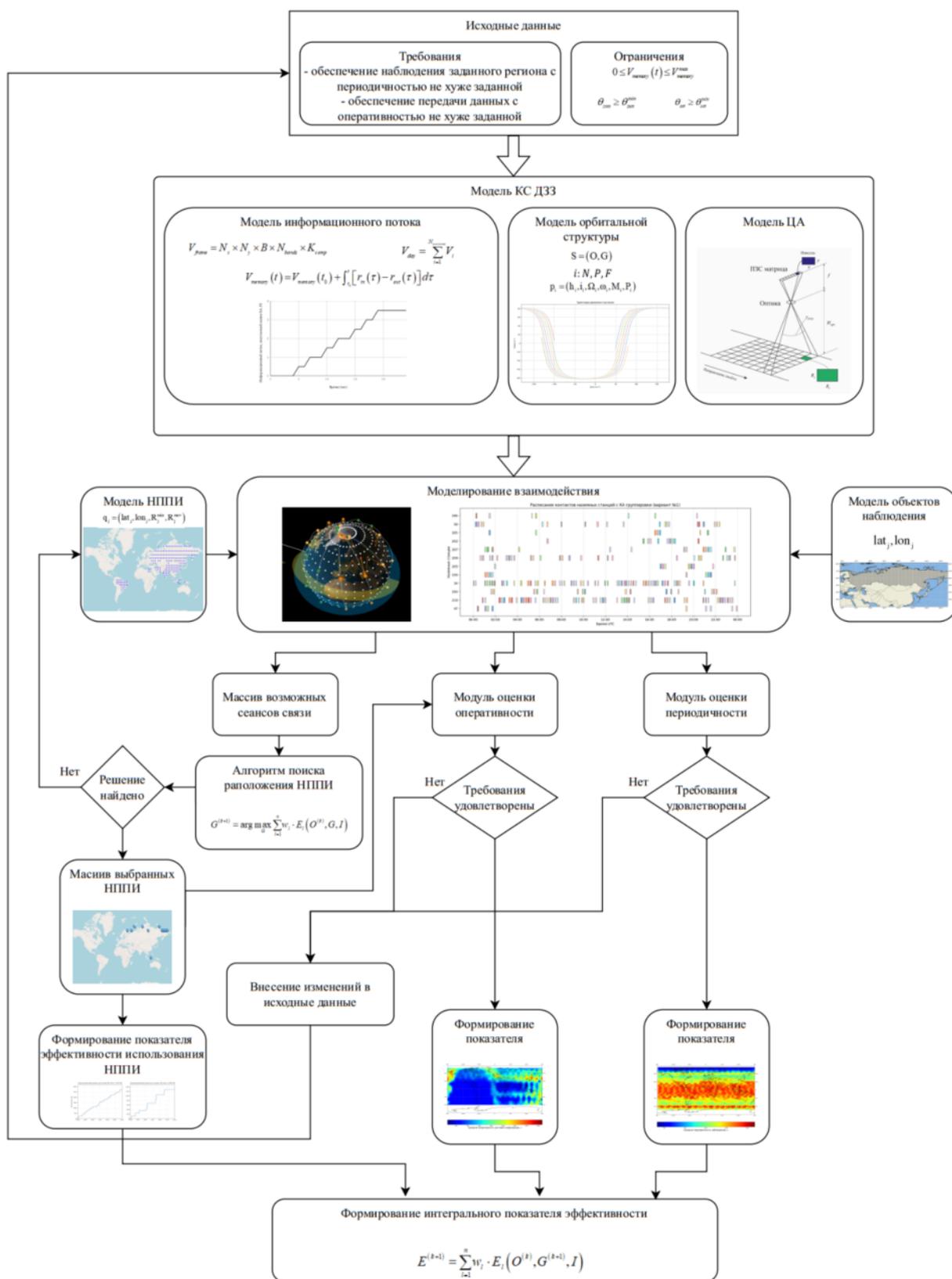


Рисунок 2.1 – Структурная схема предлагаемой методики

Задача оптимизации многоспутниковой системы ДЗЗ в общем виде может быть сформулирована следующим образом:

$$\max_{O,G,I} \sum_{l=1}^k w_l \cdot E_l(O,G,I),$$

где w_l – весовые коэффициенты, отражающие относительную важность показателей эффективности.

При ограничениях:

- на количество КА: $|O| \leq N_{max}$;

- на количество наземных станций: $|G| \leq M_{max}$;

- на стоимость системы: $C(O,G,I) \leq C_{max}$;

- на географическое расположение станций: $g_j \in A, \forall g_j \in G$, где A – множество допустимых мест размещения.

Для решения данной задачи используется интегрированная методика, включающая методы оптимизации орбитальной группировки, выбора расположения наземных станций и управления информационными потоками, описанные в разделах 2.2 и 2.3.

2.1.2 Алгоритм совместной оптимизации орбитальной группировки и наземной инфраструктуры

Алгоритм совместной оптимизации орбитальной группировки и наземной инфраструктуры основывается на итеративном подходе, когда поочерёдно оптимизируются параметры орбитальной группировки при фиксированной наземной инфраструктуре и параметры наземной инфраструктуры при фиксированной орбитальной группировке. Данный подход позволяет учесть взаимосвязи между компонентами системы и найти решение, близкое к глобальному оптимуму.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1) Инициализация:

– задание начальных параметров орбитальной группировки $O^{(0)}$;

– определение множества потенциальных мест размещения наземных станций A ;

- задание весовых коэффициентов для показателей эффективности w_l ;
- установка счётчика итераций $k = 0$.

2) Оптимизация наземной инфраструктуры:

- решение задачи выбора оптимального географического расположения наземных станций при фиксированной орбитальной группировке $O^{(k)}$ при ограничениях на количество станций и их расположение:

$$G^{(k+1)} = \arg \max_G \sum_{l=1}^n w_l \cdot E_l(O^{(k)}, G, I).$$

3) Оценка показателей функционирования:

- построение имитационной модели функционирования системы $(O^{(k)}, G^{(k+1)}, I)$;
- расчёт показателей периодичности наблюдения, оперативности передачи данных.

4) Оптимизация орбитальной группировки:

- решение задачи оптимизации параметров орбитальной группировки при фиксированной наземной инфраструктуре $G^{(k+1)}$, при ограничениях на количество КА и их параметры:

$$O^{(k+1)} = \arg \max_O \sum_{l=1}^n w_l \cdot E_l(O, G^{(k+1)}, I).$$

5) Проверка условия сходимости:

- если $|E^{(k+1)} - E^{(k)}| < \varepsilon$ или достигнуто максимальное число итераций, то алгоритм завершается;
- в противном случае увеличиваем счётчик итераций $k = k + 1$ и переходим к шагу 2.

6) Формирование результата:

- оптимальная конфигурация системы $(O^{(k)}, G^{(k)}, I)$;
- значения показателей эффективности функционирования $E_l(O^{(k)}, G^{(k)}, I)$, $l = 1, 2, \dots, n$.

Данный алгоритм был реализован в программном комплексе, описанном в главе 3, и успешно применён для оптимизации параметров многоспутниковых систем ДЗЗ различного назначения.

2.2 Методика выбора оптимального расположения наземных станций

Целью настоящего подраздела является разработка методики для определения оптимального географического положения и количества наземных станций приёма информации от группировки космических аппаратов.

При разработке методики должны учитываться: количество КА, параметры их орбит и скорость передачи данных. Цель – минимизировать число станций, обеспечив своевременную передачу данных.

2.2.1 Исходные данные и постановка задачи

Для определения оптимального географического положения и количества наземных станций приёма информации от группировки КА используются следующие исходные данные: в рамках одной группировки КА все КА имеют одинаковые: высоту орбиты, наклонение, скорость передачи данных с КА, объем информации, который необходимо передать с борта каждого КА в сутки; все орбиты круговые.

Для формирования массива исходных данных для задания параметров группировки используются переменные, приведённые в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Переменные для создания группировки КА

Переменная	Описание	Требования
$id_{constellation}$	Уникальный идентификатор спутниковой группировки	Идентификатор может принимать значения $0, 1, \dots, n$
H_{orb}	Высота орбиты	Высота должна быть 250-1000 км
i	Наклонение орбиты	Наклонение должно быть $0-110^\circ$
P	Количество плоскостей орбит	Количество плоскостей должно быть ≥ 1
N	Общее количество КА	Общее количество спутников должно быть ≥ 1
V	Скорость передачи данных с КА	Скорость должна быть задана в Мбит/с.
V	Объем информации, который необходимо передать с борта КА в сутки	Объем информации должен быть задан в гигабайтах

2.2.2 Моделирование движения КА

Для моделирования орбитального движения в настоящей работе используется существующая модель орбитального движения Simplified General Perturbations 4 (SGP4) [72] – аналитический метод прогнозирования орбит, разработанный для упрощённого учёта возмущений, вызванных гравитационными аномалиями Земли, сопротивлением атмосферы и влиянием третьих тел.

В качестве исходных данных в модели SGP4 используются Two-Line Element (TLE). TLE является стандартизированным форматом, используемым для описания параметров орбиты искусственных спутников Земли и других объектов на околоземной орбите. Формат разработан Североамериканским командованием воздушно-космической обороны (NORAD) и применяется для распространения данных об орбитах спутников через системы Space-Track [73] и CelesTrack [74].

Модель SGP4 реализует аналитический метод прогнозирования орбиты, основанный на теории возмущений. Она вычисляет положение и скорость КА путём разделения возмущающих сил на три категории: вековые, долгопериодические и короткопериодические, что позволяет избежать трудоёмкого численного интегрирования.

2.2.2.1 Генерация TLE

Использование модели SGP4 позволяет производить моделирование орбитального движения группировки КА как на этапе эксплуатации КА, используя NORAD ID уже запущенных космических аппаратов для получения TLE [74], так и на этапе проектирования, генерируя TLE для моделируемых космических аппаратов.

Каждый TLE состоит из трех строк:

- строка 0: Название объекта (необязательная, может отсутствовать);
- строка 1: Идентификационные и динамические параметры;
- строка 2: Кеплеровские элементы орбиты и дополнительные данные.

На рисунке 2.2 в качестве примера приведён TLE для МКА «АИСТ» первого поколения [75].

Two Line Element Set (TLE):

```
1 39133U 13015D 25062.11556914 .00008640 00000-0 41614-3 0 9993
2 39133 64.8741 349.3966 0027041 291.7594 68.0656 15.18998085652617
```

Рисунок 2.2 – Пример TLE для МКА «АИСТ»

В общем случае структуру TLE можно записать следующим образом:

```
1 SSSSSU JJJJJJ YYLLL.BBBBBBBB .CCCCCCCC DDDDD-E BBBB-E 0 FFFK
2 SSSSS III.IIII AAA.AAAA EEEEEEE FFF.FFFF GGG.GGGG HH.HHHHHHHRRRRR
```

Расшифровка принятых обозначений приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Расшифровка принятых в TLE обозначений

Обозначение	Расшифровка	Комментарий
1	Номер строки	Всегда 1 для первой строки
SSSSS	NORAD-номер спутника	5 цифр
U	Классификация	U – Несекретный, S – Секретный
JJJJJ	Международное обозначение	Год запуска + номер запуска в году, 6 символов
YY	Год эпохи	Последние две цифры года
LLL.BBBBBBBB	День эпохи и дробная часть дня	Формат: 3 целых цифры + дробная часть до 8 знаков
.CCCCCCCC	Первая производная среднего движения	
DDDD-E	Вторая производная среднего движения	
BBBB-E	Коэффициент торможения B*	
0	Тип эфемерид	0 – стандартные
FFF	Номер элемента данных	Порядковый номер TLE
K	Контрольная сумма	Сумма цифр строки по модулю 10
2	Номер строки	Всегда 2 для второй строки
SSSSS	NORAD-номер спутника	5 цифр
III.III	Наклонение орбиты	Указывается в градусах
AAA.AAAA	Прямое восхождение восходящего узла	Указывается в градусах
EEEEEE	Эксцентриситет	7 цифр, десятичная точка подразумевается перед первым символом, например, 0001234 → 0.0001234
FFF.FFFF	Аргумент перигея	Указывается в градусах
GGG.GGGG	Средняя аномалия	Указывается в градусах
HH.HHHHHHH	Среднее движение	Количество витков в сутки
RRRRR	Количество витков на момент эпохи	5 цифр
K	Контрольная сумма	Сумма цифр строки по модулю 10

Для генерации TLE для моделируемых космических аппаратов, входящих в состав группировки КА, предлагается использовать следующий алгоритм:

1. В качестве исходных данных используются следующие параметры, заданные в таблице 2.1: $id_{constellation}$, H_{orb} , i , P , N

2. Для получения углов долготы восходящего узла и аргумента перигея, характеризующих угловое положение КА в спутниковой группировке, используются следующие формулы для равномерного распределения N спутников на M орбитальных плоскостях:

Угловое расстояние между плоскостями:

$$\Delta\Omega = \frac{360^\circ}{P} .$$

Угловое расстояние между спутниками в плоскости:

$$\Delta\omega = \frac{360^\circ}{N/P} ,$$

Распределение параметров орбиты для i -го спутника в j -й плоскости:

Долгота восходящего узла:

$$\Omega_{i,j} = j \cdot \Delta\Omega .$$

Аргумент перигея:

$$\omega_{i,j} = i \cdot \Delta\omega .$$

3. Для каждого спутника группировки должны быть рассчитаны орбитальный период T и среднее движение n :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} ,$$

где $\mu = 3,986004418 \times 10^{14} \text{ м}^3 / \text{с}^2$ – стандартный гравитационный параметр Земли, a – большая полуось орбиты.

$$n = \frac{86400}{T} .$$

4. Создать TLE подставив рассчитанные значения $\Omega_{i,j}$, ω_{ij} , n в соответствующие положения.

На рисунке 2.3 приведён пример сгенерированных TLE для группировки КА со следующими параметрами: высота орбиты $H_{orb} = 490$ км, наклонение $i = 98^\circ$, количество плоскостей $M = 1$, общее количество КА $N = 4$.

```

1 0-0-0U 00001A 24000.00000000 .00000000 00000-0 00000-0 0 9999
2 0-0-0 098.0000 000.0000 00000000 000.0000 000.0000 15.27642151 9992

1 0-0-1U 00001A 24000.00000000 .00000000 00000-0 00000-0 0 9990
2 0-0-1 098.0000 000.0000 00000000 090.0000 000.0000 15.27642151 9992

1 0-1-0U 00001A 24000.00000000 .00000000 00000-0 00000-0 0 9990
2 0-0-2 098.0000 000.0000 00000000 180.0000 000.0000 15.27642151 9993

1 0-1-1U 00001A 24000.00000000 .00000000 00000-0 00000-0 0 9991
2 0-0-3 098.0000 000.0000 00000000 270.0000 000.0000 15.27642151 9994

```

Рисунок 2.3 – Пример сгенерированных TLE для группировки КА

2.2.2.2 Алгоритм моделирования орбитального движения

1. На вход модели подаются параметры из TLE:

- эпоха t_0 (момент времени, на который заданы элементы);

- среднее движение n_0 (оборотов в день), эксцентриситет e_0 , наклонение i_0 , аргумент перигея ω_0 , средняя аномалия M_0 ;

- баллистический коэффициент B^* , связанный с сопротивлением атмосферы.

2. Расчет вековых возмущений: обновляются n , Ω , ω , M с учетом второй зональной гармоники геопотенциала J_2 и влияния атмосферы.

- долгопериодические поправки: добавляются члены, зависящие от ω и M ;

- короткопериодические поправки: учитываются гармоники J_3, J_4 и т.д.

3. Расчёт оскулирующих элементов орбиты:

На основе TLE и моделей возмущений определяются скорректированные параметры орбиты:

- большая полуось a , эксцентриситет e , наклонение i .

- долгота восходящего узла Ω , аргумент перигея ω , средняя аномалия M .

На рисунке 2.3 представлены траектории полёта для сгенерированных TLE группировки КА, представленной выше.

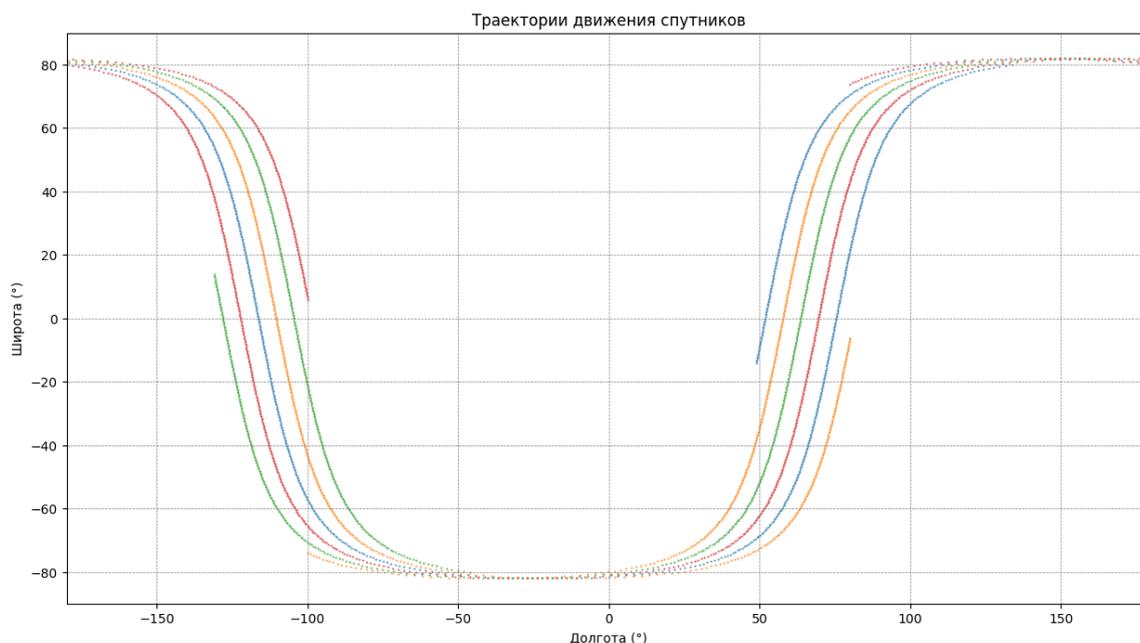


Рисунок 2.4 – Трассы полёта для сгенерированных TLE спутников
космической системы

2.2.3 Алгоритм формирования множества станций кандидатов с учётом ограничений

Для формирования множества потенциальных мест размещения наземных пунктов приёма информации необходимо учитывать следующие факторы:

- определяется список государств и регионов, где размещение НППИ невозможно из-за законодательных запретов, международных санкций или политической нестабильности;
- исключаются водоёмы, заповедники и территории с ограниченным доступом;
- должны быть исключены регионы с высокой частотой осадков, гроз, снегопадов, которые могут негативно влиять на радиосвязь;
- должны быть исключены регионы с экстремальными температурами и влажностью, влияющими на оборудование;
- должно учитываться наличие инфраструктуры (энергоснабжение, транспортная доступность) для снижения затрат на строительство;

– должен учитываться рельеф местности, а предпочтение отдаётся равнинным участкам без горных массивов, которые могут уменьшать время видимости между НППИ и КА.

Таким образом, пусть существует множество стран, где возможно установить НППИ $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, где для каждой $c_i \in C$ задан параметр $r_i \in \{0, 1\}$, который указывает следует ли рассматривать региональное деление внутри страны.

Для c_i при $r_i = 0$: геометрия страны загружается как единый полигон P_i . Для c_i при $r_i = 1$: загружается множество выбранных регионов указанной страны $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}$ и объединяются в единый полигон P_i .

Итоговый географический полигон, внутри которого возможно расположить НППИ выражается:

$$P_{\text{общ}} = \bigcup_{i=1}^n \left(\begin{cases} P_i, & r_i = 0 \\ \bigcup_{j=1}^k R_{ij}, & r_i = 1 \end{cases} \right).$$

Множество НППИ-кандидатов генерируется с шагом Δ , заданным в градусах:

$$G = \{(lat, lon) \mid lat = lat_{min} + i \cdot \Delta, lon = lon_{min} + j \cdot \Delta, i, j \in \mathbb{Z}, lat_{min} \leq lat \leq lat_{max}, lon_{min} \leq lon \leq lon_{max}\},$$

где lat_{min} , lat_{max} , lon_{min} , lon_{max} – минимальные и максимальные координаты объединённого полигона.

Для каждой точки $g \in G$ проверяется выполнение ограничений: 1) $lat_{min}^{th} \leq lat \leq lat_{max}^{th}$, где lat_{min}^{th} , lat_{max}^{th} – границы допустимой широты, характеризующие сложность установки НППИ в приполярных регионах. 2) Принадлежность к заданному географическому полигону, где возможно расположение НППИ: $g \in P$.

В результате формируется множество географических координат НППИ-кандидатов G^* , удовлетворяющих всем ограничениям, где:

$$G^* = \{g \in G \mid lat_{min}^{th} \leq lat_g \leq lat_{max}^{th}, g \in P\}.$$

На рисунке 2.4 показано нанесение сформированного массива G' географических координат НППИ-кандидатов.

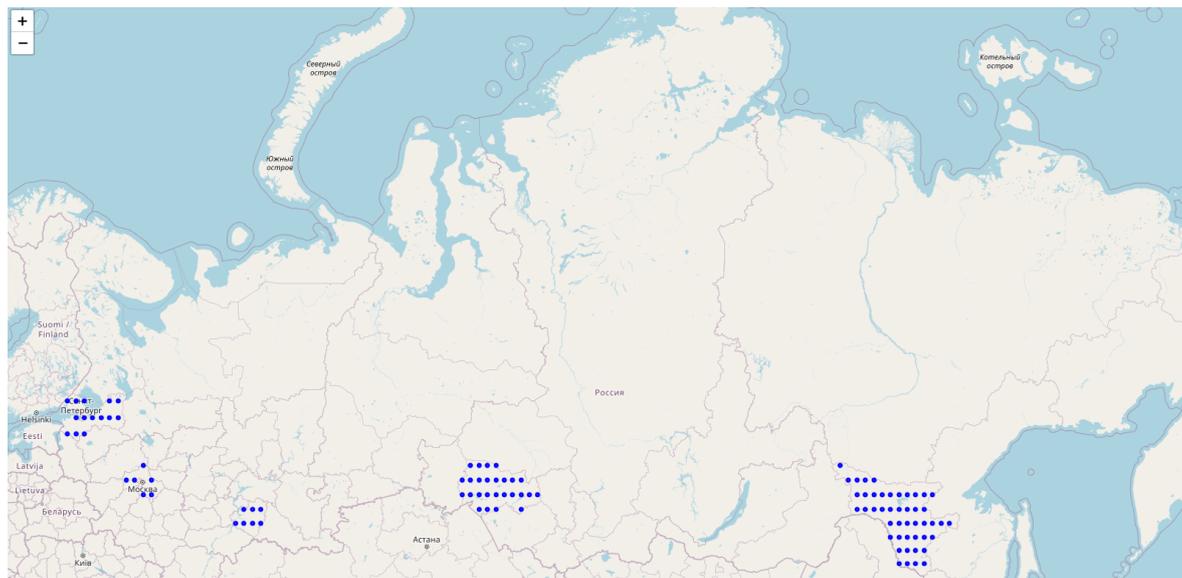


Рисунок 2.5 – Сформированный массив географических координат НППИ-кандидатов

В качестве исходных данных для формирования массива, представленного на рисунке 2.4, использовалось: $lat_{min}^{th} = -65^\circ$, $lat_{max}^{th} = 75^\circ$ – в качестве границ допустимой широты; шаг сетки $\Delta = 1^\circ$; в качестве географических ограничений были выбраны границы нескольких регионов Российской Федерации.

2.2.4 Алгоритм расчёта временных интервалов радиовидимости космических аппаратов с наземными станциями

Алгоритм предназначен для определения временных интервалов, в течение которых обеспечивается радиовидимость между КА и НППИ. Дополнительно вычисляется объём данных, который может быть передан за сеанс связи. Для каждого спутника и станции необходимо: – определить моменты времени, когда угол возвышения спутника превышает заданный минимум; – рассчитать продолжительность сеанса связи и объём передаваемых данных.

Определение интервалов видимости спутника sat с наземной станцией st сводится к решению следующих задач:

1. Расчёт траектории КА в геоцентрической системе координат.
2. Преобразование координат в топоцентрическую систему станции st .

3. Вычисление угла возвышения и проверка условия радиовидимости. Условие радиовидимости определяется в топоцентрической системе координат. Критерием видимости является выполнение неравенства:

$$\theta \geq \theta_{min},$$

где θ – угол возвышения КА над горизонтом; θ_{min} – минимально допустимый угол возвышения (обычно принимает значение от 5° до 10°).

Угол возвышения вычисляется через разность векторов положения КА (\vec{r}_{sat}) и станции (\vec{r}_{st}) в геоцентрической системе:

$$\vec{\rho} = \vec{r}_{sat} - \vec{r}_{st}.$$

Проекция $\vec{\rho}$ на местную вертикаль:

$$\sin \theta = \frac{\vec{\rho} \cdot \vec{n}}{\rho},$$

где \vec{n} – единичный вектор вертикали станции.

Вычисление интервалов радиовидимости. Временной диапазон разбивается на дискретные моменты с шагом Δt . Для каждого момента времени:

- вычисляются эфемериды КА и станции;
- определяется вектор относительного положения;
- проверяется условие $\theta \geq \theta_{min}$.

Интервалы контактов выделяются путем анализа бинарной маски видимости $v(t)$, где $v(t) = 1$ при выполнении условия видимости в момент t . Начало и конец интервалов соответствуют переходам:

$$v(t_i) = 0 \rightarrow v(t_{i+1}) = 1 \text{ или } v(t_i) = 1 \rightarrow v(t_{i+1}) = 0.$$

Продолжительность сеанса связи определяется следующим образом. Для каждого момента времени определяется $v(t_i)$. Таким образом:

Начало сеанса связи: $t_{start} = t_i$ при $v(t_{i-1}) = 0, v(t_i) = 1$.

Конец сеанса связи: $t_{end} = t_i$ при $v(t_i) = 1, v(t_{i+1}) = 0$.

В таком случае длительность сеанса связи: $\Delta t_{session} = t_{end} - t_{start}$.

2.2.5 Задача выбора минимального количества НППИ

2.2.5.1 Формулировка задачи

Необходимо минимизировать количество используемых НППИ, обеспечивая выполнение следующих условий: каждый КА получает достаточно времени связи с НППИ для передачи заданного объёма данных; сеансы связи, пересекающиеся во времени, не используют одну и ту же станцию или спутник одновременно.

2.2.5.2 Решение задачи с использованием жадного алгоритма

Задача выбора минимального количества НППИ может быть решена путём использования жадного алгоритма.

Пусть задано: Множество спутников $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ с требованиями по времени передачи данных $T_{\text{req}}(o_i)$. Множество станций $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ каждая из которых имеет временные окна контактов $C(g_j) = \{[t_{\text{start}}^{(k)}, t_{\text{end}}^{(k)}]\}$ со спутниками.

В этом случае задача может быть сформулирована следующим образом: требуется найти минимальное подмножество станций $G' \subseteq G$, обеспечивающее выполнение:

$$\sum_{\substack{c \in C(g_j) \\ g_j \in G'}} \Delta t(g_j, o_i) \geq T_{\text{req}}(o_i), \quad \forall o_i \in O,$$

где: $\Delta t(g_j, o_i)$ – длительность сеанса связи спутника o_i через станцию g_j , а контакты не пересекаются во времени для каждой станции и спутника.

Алгоритм реализует стратегию последовательной максимизации целевого критерия на каждом шаге. Основные этапы:

1. Формирование требований по времени передачи данных $T_{\text{req}}(o_i)$ на основе параметров группировки:

$$T_{\text{req}}(o_i) = \frac{D_{\text{daily}}(o_i)}{R_{\text{data}}(o_i)},$$

где D_{daily} – суточный объём данных, который требуется передать спутнику o_i , R_{data} – скорость передачи данных спутника s_i .

2. На каждой итерации выбирается станция g_j , максимизирующая прирост времени сеансов связи:

$$g^* = \operatorname{argmax}_{g_j \in G \setminus G'} \left[\alpha \cdot |O_{\text{new}}(g_j)| + \beta \cdot \sum_{o_i \in O_{\text{new}}(g_j)} \min(T_{\text{sum}}(o_i) + \Delta t(g_j, o_i), T_{\text{req}}(o_i)) \right],$$

где: $O_{\text{new}}(g_j)$ – спутники, чьи требования могут быть удовлетворены при добавлении g_j ; α, β – весовые коэффициенты; $T_{\text{sum}}(o_i)$ – накопленное время передачи для o_i ; $\Delta t(g_j, o_i)$ – дополнительное время, которое может предоставить станция g_j для спутника o_i .

В приведённом выше условии $\alpha \cdot |O_{\text{new}}(g_j)|$ – отражает приоритет станций, покрывающих наибольшее число спутников, ещё не достигших своих требований $T_{\text{req}}(o_i)$; $\beta \cdot \sum \min(\cdot)$ – учитывает вклад станции в суммарное полезное время передачи для новых спутников и ограничивает вклад времени, превышающего $T_{\text{req}}(o_i)$, чтобы избежать перераспределения ресурсов в ущерб другим спутникам.

3. Для каждого кандидата g_j и o_i выполняется проверка удовлетворения ограничений о непересечении временных интервалов:

$$\text{Для станции } g_j : \forall c_k, c_l \in C(g_j), k \neq l \rightarrow [t_{\text{start}}^k, t_{\text{end}}^k] \cap [t_{\text{start}}^l, t_{\text{end}}^l] = \emptyset.$$

$$\text{Для спутника } o_i : \forall c_k, c_l \in C(o_i), k \neq l \rightarrow [t_{\text{start}}^k, t_{\text{end}}^k] \cap [t_{\text{start}}^l, t_{\text{end}}^l] = \emptyset.$$

Алгоритм завершает работу при выполнении одного из условий:

- все спутники удовлетворяют требованиям $T_{\text{sum}}(o_i) \geq T_{\text{req}}(o_i)$;
- невозможно добавить новые станции без конфликтов.

Итоговый алгоритм решения задачи представлен на рисунке 2.6.

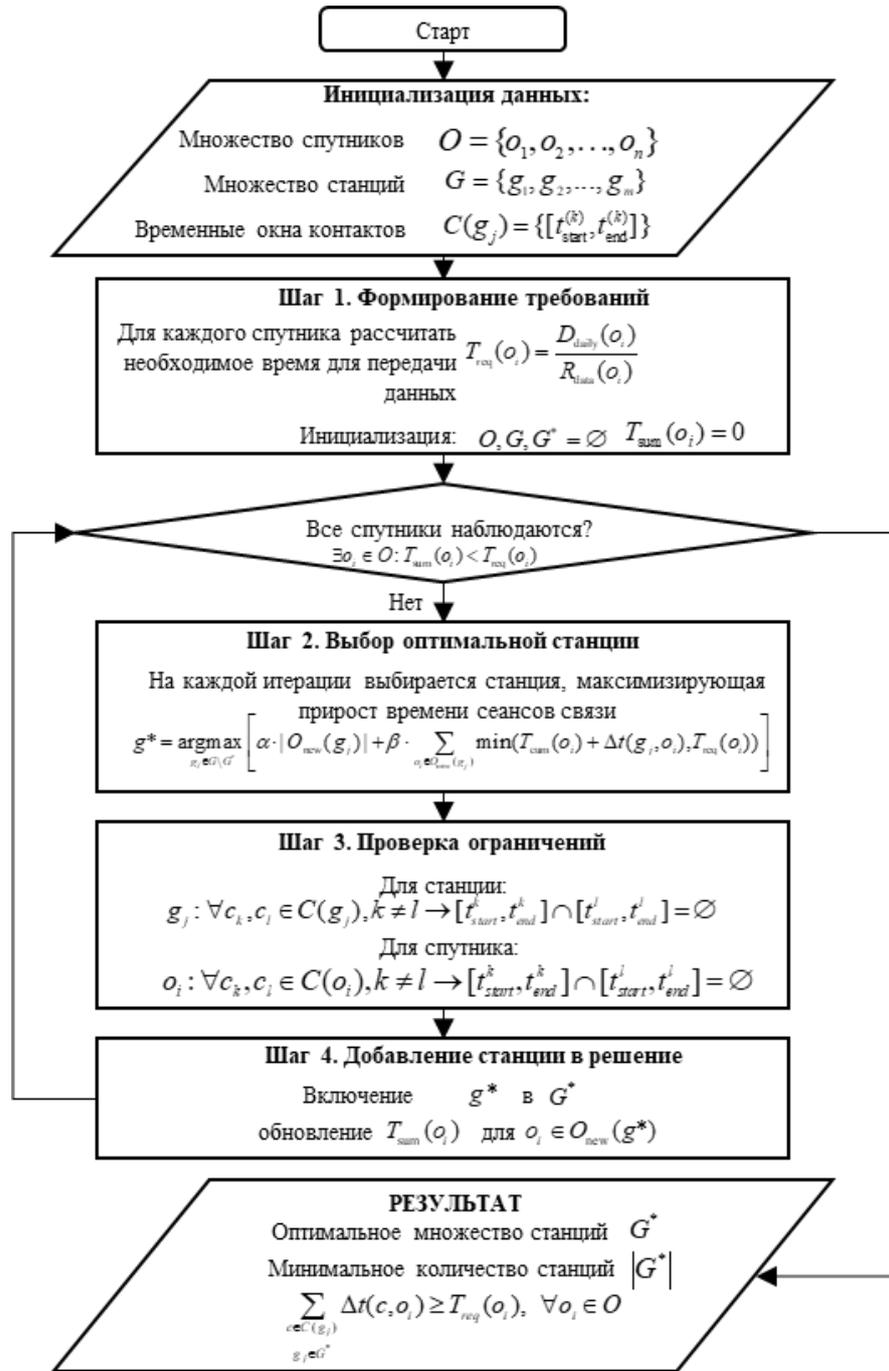


Рисунок 2.6 – Алгоритм решения задачи выбора минимального количества НППИ

Представленный алгоритм позволяет найти локально оптимальное решение. Выбор станции основывается на текущем состоянии покрытия, что не гарантирует глобального оптимума, но обеспечивает линейную сложность. В свою очередь введение весовых коэффициентов $\alpha > \beta$ смещает фокус на покрытие максимального числа спутников против оптимизации времени. После добавления станции требования $T_{\text{req}}(o_i)$ уменьшаются на величину $\Delta t(g_j, o_i)$.

2.3 Разработка имитационной модели для оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ

2.3.1 Модель оценки покрытия поверхности Земли

2.3.1.1 Методика оценки покрытия с использованием имитационного моделирования

В качестве способа оценки покрытия поверхности Земли КА ДЗЗ в настоящей работе предлагается использовать имитационное моделирование орбитального движения, при этом на поверхность Земли наносится сетка точек, попадание которых в зону обзора целевой аппаратуры будет детектироваться. С помощью такого подхода становится возможным определить как процент снимаемой поверхности, так и периодичность наблюдения того или иного региона.

Поверхность Земли аппроксимируется регулярной сеткой точек, где координаты задаются в диапазоне: долгота: от -180° до 180° , широта: от -90° до 90° .

Таким образом можно создавать как сетку точек для анализа глобального покрытия (рисунок 2.7), так и создавать сетки точек только для локальных зон интереса (рисунок 2.8).

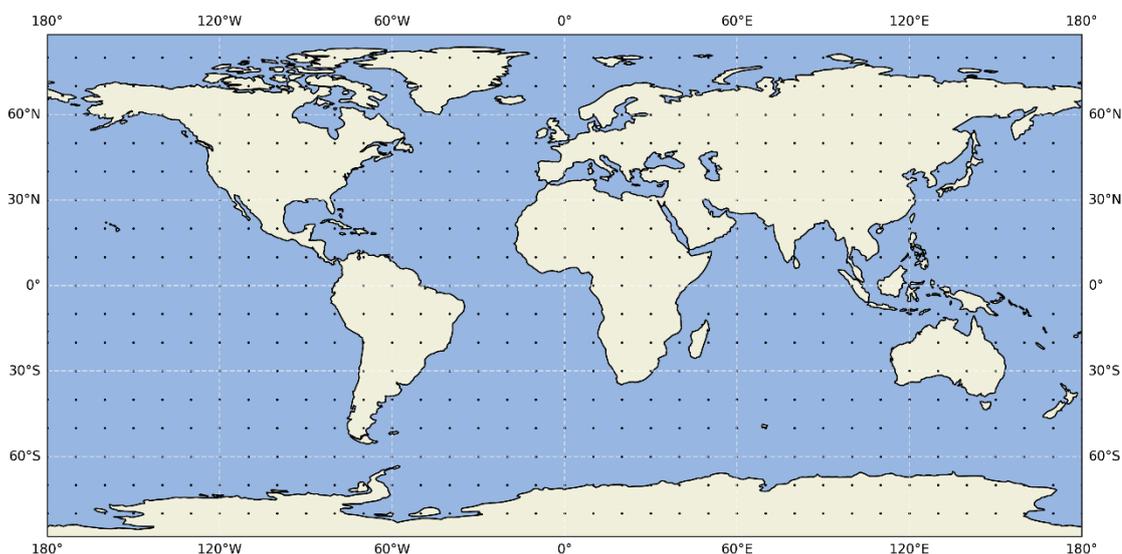


Рисунок 2.7 – Сетка точек для оценки глобального покрытия

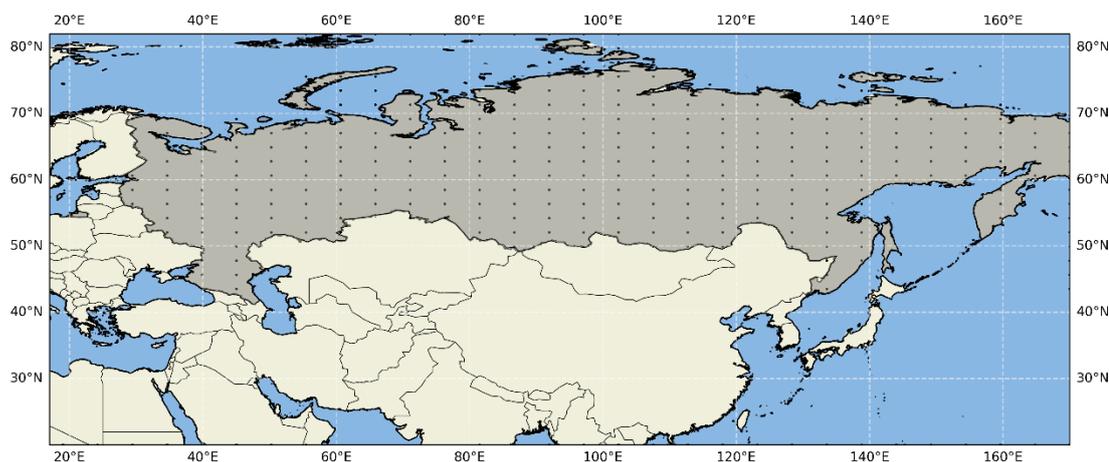


Рисунок 2.8 – Сетка точек для оценки локального покрытия

Варьируя расстояние между точками (Δ), можно производить оценку показателей с необходимой точностью.

2.3.1.2 Условия видимости и моделирование зон обзора целевой аппаратуры

Для каждой точки сетки вычисляются два угла: угол возвышения КА и угол возвышения Солнца. На рисунке 2.9 представлена геометрия условий видимости точки наблюдения.

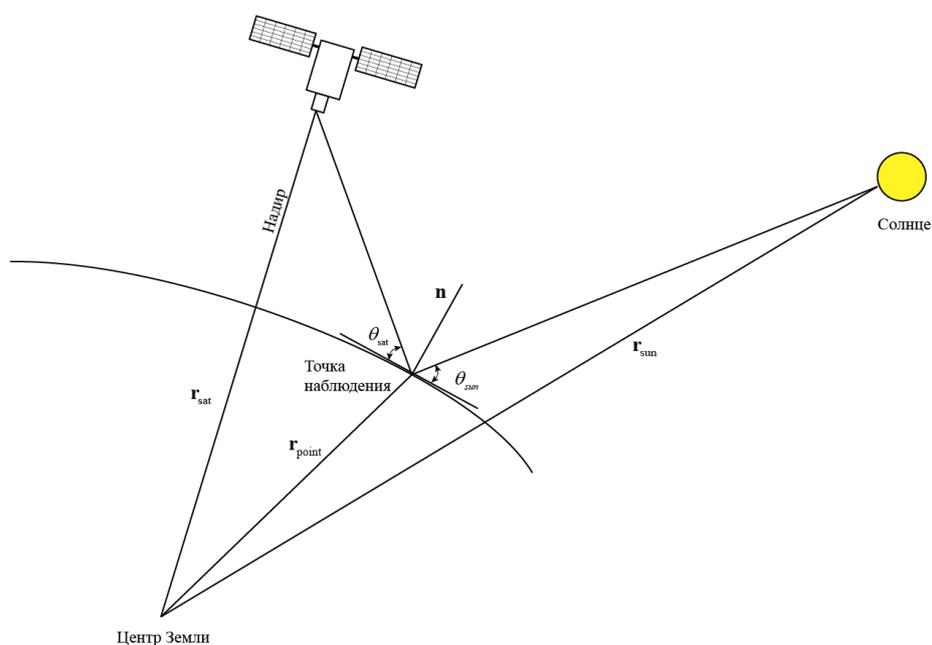


Рисунок 2.9 – Геометрия условий видимости наблюдаемой точки

Пусть \vec{r}_{sat} – радиус-вектор позиции КА, \vec{r}_{point} – радиус-вектор позиции точки на поверхности Земли, а \vec{n} – единичный вектор, нормальный к поверхности Земли в данной точке. Тогда угол возвышения спутника θ_{sat} определяется по формуле:

$$\sin\theta_{sat} = \frac{(\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{point}) \cdot \vec{n}}{|\vec{r}_{sat} - \vec{r}_{point}|}.$$

Аналогичным образом, используя вектор, направленный от точки к Солнцу, вычисляется угол возвышения Солнца θ_{sun} :

$$\sin\theta_{sun} = \frac{(\vec{r}_{sun} - \vec{r}_{point}) \cdot \vec{n}}{|\vec{r}_{sun} - \vec{r}_{point}|}.$$

Для того чтобы точка считалась потенциально наблюдаемой, должны выполняться следующие условия:

- 1) Угол возвышения Солнца должен быть больше заданного:

$$\theta_{sun} \geq \theta_{sun}^{min}$$

- 2) Угол возвышения КА должен быть больше заданного:

$$\theta_{sat} \geq \theta_{sat}^{min}$$

2.3.1.3 Модели конической и прямоугольной проекции зон обзора

Форма зоны обзора целевой аппаратуры зависит от типа аппаратуры и её характеристик. На рисунке 2.10 показана геометрия простейшей модели наблюдения, в которой полагается, что зона обзора представляет собой конус с углом полураствора α .

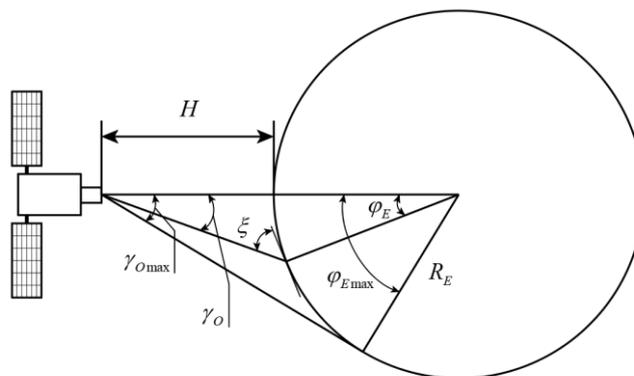


Рисунок 2.10 – Геометрия модели наблюдения

Максимально возможная для наблюдения территория Земли, охватываемая космическим аппаратом, характеризуется предельным углом $\varphi_{E \max}$:

$$\varphi_{E \max} = \arccos\left(\frac{R_E}{R_E + H}\right)$$

где R_E – радиус Земли, H – высота орбиты, γ_O – угол обзора аппаратуры наблюдения, φ_E – центральный угол.

Аппаратура наблюдения характеризуется углом обзора γ_O , и при съемке в надир обозревает на поверхности Земли сферический сегмент. В этом случае размеры снимаемой поверхности характеризуются центральным углом φ_E (рисунок 2.8):

$$\varphi_E = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{R_E + H}{R_E} \sin \gamma_O\right) - \gamma_O,$$

где R_E – радиус Земли, H – высота орбиты, γ_O – угол обзора аппаратуры наблюдения, φ_E – центральный угол.

Следует отметить, что рассмотренная модель зоны обзора применима для оценки покрытия не только целевой аппаратуры наблюдения, но и антенных устройств КА.

Зона обзора прямоугольной формы представляется в виде проекции пирамиды с двумя углами обзора: горизонтальным α_h и вертикальным α_v (рисунок 2.11).

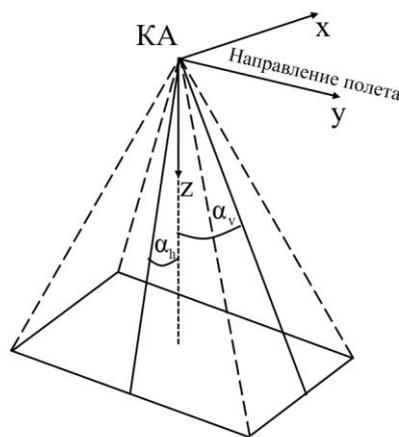


Рисунок 2.11 – Зона обзора прямоугольной формы

В зависимости от выбранного типа полезной нагрузки, для каждой временной отметки рассчитывается соответствующая область на поверхности Земли. Факт попадания точек сетки определяется в тот момент, когда точка находится в пределах зоны обзора целевой аппаратуры.

На рисунках 2.12а,б представлены результаты моделирования одного витка орбиты КА с круговой ($\alpha = 15^\circ$), На рисунках 2.12 в,г прямоугольной ($\alpha_h = 25^\circ$, $\alpha_v = 3^\circ$) зонами обзора аппаратуры наблюдения, при $H = 500$ км и заданных ограничениях: $\theta_{sun}^{min} = 10^\circ$, $\theta_{sat}^{min} = 20^\circ$.

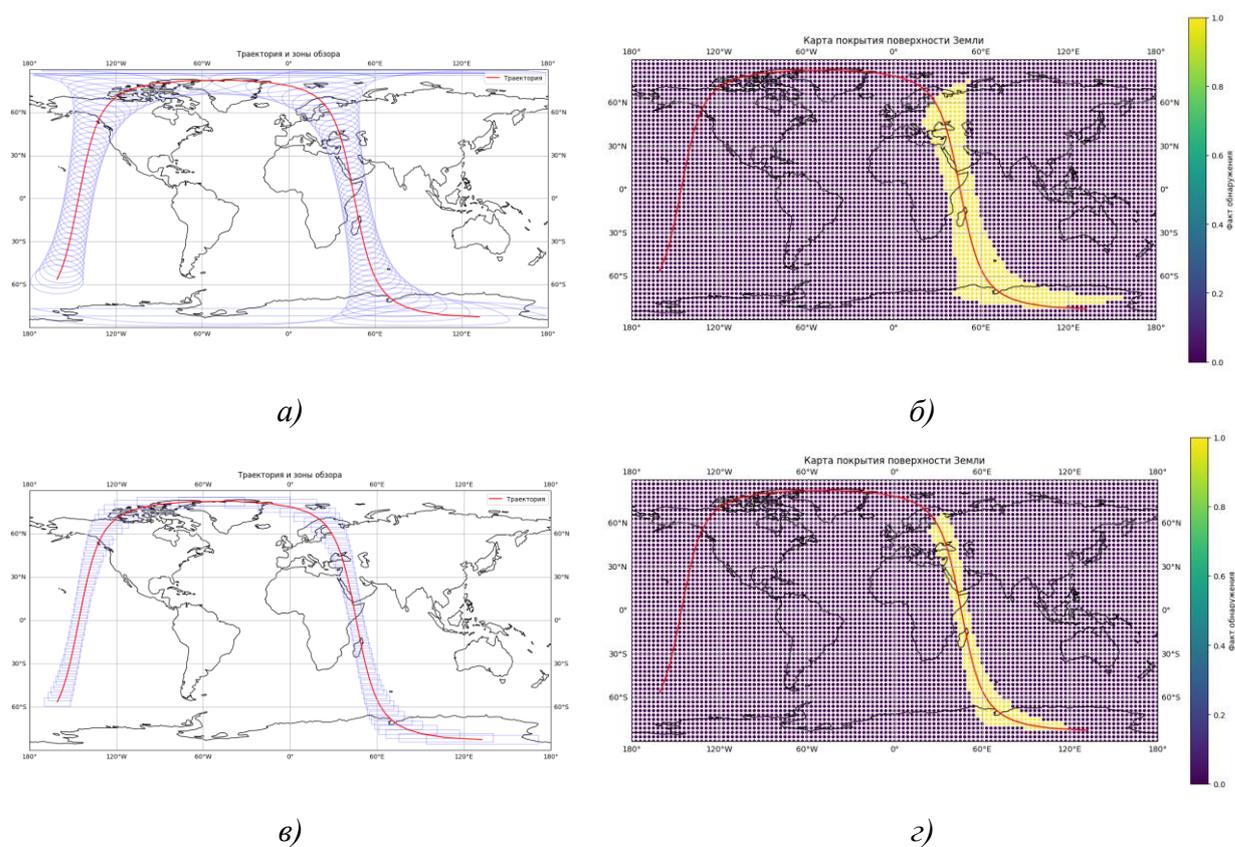


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования одного витка орбиты КА

На графиках слева показана трасса полёта КА и проекции зон обзора для каждого шага моделирования. На рисунках 2.12 б,г каждая точка сетки представлена цветовой кодировкой, отражающей факт попадания в зону обзора, жёлтым выделены точки, которые удовлетворяют заданным ограничениям и, следовательно, могут быть наблюдаемы съёмочной аппаратурой КА.

2.3.2 Оценка периодичности наблюдения земной поверхности с помощью имитационного моделирования

Периодичность наблюдения определяется как интервал времени между последовательными случаями, когда заданная точка на поверхности Земли оказывается в зоне обзора полезной нагрузки спутника. Знание этих интервалов имеет критическое значение для планирования миссий, оценки эффективности функционирования систем мониторинга и разработки алгоритмов обработки данных. Имитационное моделирование позволяет количественно оценить повторяемость наблюдений, анализируя временную динамику покрытия земной поверхности в рамках заданного временного интервала.

2.3.2.1 Методика расчёта периодичности наблюдения

В первую очередь формируется временной ряд наблюдений. На основе дискретизации времени в интервале $[t_0, t_0 + T]$ с шагом Δt для каждой точки сетки определяется булевый временной ряд:

$$Obs(point, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если точка } point \text{ видима в момент } t_i \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

При этом N – общее число временных шагов моделирования.

Затем происходит вычисление интервалов между наблюдениями. Для каждой точки сетки извлекается множество временных меток наблюдений:

$$T_{obs}(point) = \{t_i | Obs(point, t_i) = 1, i = 1, 2, \dots, N\},$$

где M – число моментов, когда точка находится в зоне обзора. Интервалы между последовательными наблюдениями рассчитываются как:

$$\Delta T_j(point) = T_{obs}(point)[j+1] - T_{obs}(point)[j], j = 1, 2, \dots, M-1.$$

В случае, если точка не наблюдается или наблюдение происходит единожды, интервал интерпретируется как недоступный для оценки или равный бесконечности.

Периодичность наблюдения зависит от:

– орбитальных параметров спутника: наклонение орбиты, период обращения, аргумент перигея и прочие параметры влияют на динамику покрытия;

– параметров полезной нагрузки: тип зоны обзора (коническая или прямоугольная), углы обзора и связанные с ними геометрические преобразования определяют площадь покрытия в каждый момент времени;

– дискретизации по времени: выбор шага Δt должен быть достаточно мал, чтобы корректно фиксировать моменты входа и выхода точки из зоны обзора, но при этом не создавать избыточной вычислительной нагрузки.

2.3.2.2 Статистический анализ результатов моделирования периодичности

Для анализа результатов моделирования периодичности наблюдения используются следующие статистические характеристики:

- 1) Средняя периодичность наблюдения для точки *point* :

$$\overline{\Delta T}(point) = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^{M-1} \Delta T_j(point)$$

- 2) Минимальная периодичность наблюдения для точки *point* :

$$\Delta T_{min}(point) = \min_{j=1, \dots, M-1} \Delta T_j(point)$$

- 3) Максимальная периодичность наблюдения для точки *point* :

$$\Delta T_{max}(point) = \max_{j=1, \dots, M-1} \Delta T_j(point)$$

- 4) Стандартное отклонение периодичности наблюдения для точки *point* :

$$\sigma_{\Delta T}(point) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^{M-1} (\Delta T_j(point) - \overline{\Delta T}(point))^2}$$

- 5) Коэффициент вариации периодичности наблюдения для точки *point* :

$$CV_{\Delta T}(point) = \frac{\sigma_{\Delta T}(point)}{\overline{\Delta T}(point)}$$

Значение коэффициента вариации характеризует равномерность наблюдения: чем ниже значение, тем более равномерное наблюдение.

Для глобальной характеристики периодичности наблюдения всей поверхности или заданного региона используются усреднённые показатели по всем

точкам сетки, а также тепловые карты распределения периодичности по поверхности Земли.

2.3.3 Модель информационного потока, генерируемого полезной нагрузкой КА ДЗЗ

2.3.3.1 Методика расчёта объёма информации, генерируемого при съёмке

Объём информации, генерируемый при съёмке участка земной поверхности, зависит от характеристик целевой аппаратуры и параметров съёмки. Для оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ объём информации, получаемый при съёмке единичного кадра, может быть рассчитан по формуле:

$$V_{frame} = N_x \times N_y \times B \times N_{bands} \times K_{comp},$$

где: N_x и N_y – количество пикселей в строке и столбце соответственно; B – битность (количество бит на пиксель); N_{bands} – количество спектральных каналов; K_{comp} – коэффициент сжатия данных (отношение объёма исходных данных к объёму сжатых данных).

Для маршрутной съёмки полоса захвата определяется шириной кадра на поверхности Земли, а длина маршрута – протяжённостью заданного участка съёмки. Объём информации, генерируемый при маршрутной съёмке, может быть рассчитан по формуле:

$$V_{route} = V_{frame} \times \frac{L_{route}}{L_{frame}},$$

где: L_{route} – длина маршрута съёмки; L_{frame} – размер проекции кадра на поверхность Земли в направлении движения спутника.

2.3.3.2 Модель формирования информационного потока на борту КА

Информационный поток на борту КА формируется в результате работы целевой аппаратуры во время сеансов съёмки. Для моделирования информационного потока необходимо учитывать:

Характеристики целевой аппаратуры:

- поле зрения и пространственное разрешение;

- спектральные характеристики (количество и ширина каналов);
- параметры кодирования и сжатия данных.

Режимы работы аппаратуры:

- съёмка в надира;
- стереосъёмка;
- съёмка с отклонением от надира;
- непрерывная съёмка или съёмка отдельных районов.

Ограничения на работу аппаратуры:

- энергетические ограничения;
- ограничения по объёму бортовой памяти.

Суммарный информационный поток, генерируемый КА за сутки, может быть рассчитан как:

$$V_{day} = \sum_{i=1}^{N_{sessions}} V_i,$$

где: $N_{sessions}$ – количество сеансов съёмки за сутки; V_i – объем информации, полученный в i -м сеансе съёмки.

2.3.3.3 Моделирование хранения и передачи информационных потоков

Для моделирования процессов хранения и передачи информационных потоков на борту КА необходимо учитывать следующие факторы:

- 1) характеристики бортового запоминающего устройства:
 - объем памяти;
 - скорость записи и чтения;
 - ограничения по циклам перезаписи.
- 2) характеристики канала передачи данных:
 - скорость передачи данных;
 - протоколы передачи данных.

Состояние бортовой памяти в момент времени t можно рассчитать по формуле:

$$V_{memory}(t) = V_{memory}(t_0) + \int_{t_0}^t [r_{in}(\tau) - r_{out}(\tau)] d\tau,$$

где: $V_{memory}(t_0)$ – объем занятой памяти в начальный момент времени t_0 ; $r_{in}(t)$ – скорость поступления данных от целевой аппаратуры; $r_{out}(t)$ – скорость передачи данных на наземные станции.

При этом должно выполняться ограничение:

$$0 \leq V_{memory}(t) \leq V_{memory}^{max},$$

где V_{memory}^{max} – максимальный объем бортовой памяти.

Скорость поступления данных $r_{in}(t)$ определяется режимом работы целевой аппаратуры:

$$r_{in}(t) = \begin{cases} R_{imaging}, & \text{если в момент } t \text{ проводится съемка} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где $R_{imaging}$ – скорость формирования данных при работе целевой аппаратуры.

Скорость передачи данных $r_{out}(t)$ определяется доступностью наземных станций:

$$r_{out}(t) = \begin{cases} R_{downlink}, & \text{если в момент } t \text{ КА в зоне видимости станции} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

где $R_{downlink}$ – скорость передачи данных по радиоканалу.

2.3.4 Оценка оперативности доставки информации на наземные станции с помощью имитационного моделирования

2.3.4.1 Методика расчёта оперативности доставки информации

Оперативность доставки информации определяется как время от момента съёмки до момента получения данных на наземной станции. Для оценки оперативности доставки информации с использованием имитационного моделирования необходимо моделировать полный цикл получения, хранения и передачи данных:

- моделирование моментов съёмки участков земной поверхности, представляющих интерес;
- моделирование накопления данных на борту КА;

- моделирование сеансов связи с наземными станциями;
- расчёт времени доставки данных для каждого участка съёмки.

Время доставки данных для участка, снятого в момент $t_{imaging}$, рассчитывается как:

$$T_{delivery} = t_{downlink} - t_{imaging},$$

где $t_{downlink}$ – момент времени, когда данные были переданы на наземную станцию.

Для определения $t_{downlink}$ необходимо моделировать процесс передачи данных с учётом приоритетов, очередей и доступности наземных станций. В общем случае $t_{downlink}$ зависит от: объёма данных, полученных при съёмке; объёма данных, накопленных на борту КА до момента съёмки; доступности наземных станций после момента съёмки; скорости передачи данных; алгоритма планирования передачи данных (приоритеты, очереди и т.д.)

2.3.4.2 Модель с одной наземной станцией

В случае использования одной наземной станции модель оперативности доставки информации может быть представлена следующим образом:

Определение моментов видимости наземной станции с КА:

$$T_{visibility} = \{(t_{start}^i, t_{end}^i) | i = 1, 2, \dots, N_{passes}\},$$

где (t_{start}^i, t_{end}^i) – интервал времени i -го пролёта КА над станцией, N_{passes} – количество пролётов за рассматриваемый период.

Расчёт объёма данных, который может быть передан во время каждого пролёта:

$$V_{pass}^i = R_{downlink} \times (t_{end}^i - t_{start}^i) \times K_{eff},$$

где $R_{downlink}$ – скорость передачи данных, K_{eff} – коэффициент эффективности использования сеанса связи (учитывает время на установление связи, переключение режимов и т.д.).

Моделирование очереди передачи данных:

- Данные съёмки добавляются в очередь передачи в момент завершения съёмки

- Во время каждого пролёта передаётся объем данных, не превышающий V_{pass}^i , начиная с начала очереди
- Для каждого участка съёмки фиксируется момент передачи данных $t_{downlink}$

Расчёт оперативности доставки для каждого участка съёмки:

$$T_{delivery} = t_{downlink} - t_{imaging}$$

Статистические характеристики оперативности доставки:

- Средняя оперативность: $\bar{T}_{delivery} = \frac{1}{N_{scenes}} \sum_{j=1}^{N_{scenes}} T_{delivery}^j$

- Минимальная оперативность: $T_{delivery}^{min} = \min_{j=1, \dots, N_{scenes}} T_{delivery}^j$

- Максимальная оперативность: $T_{delivery}^{max} = \max_{j=1, \dots, N_{scenes}} T_{delivery}^j$.

2.3.4.3 Модель с несколькими наземными станциями

В случае использования нескольких наземных станций модель усложняется, поскольку необходимо учитывать возможность передачи данных на различные станции и оптимизировать распределение данных между станциями для минимизации общего времени доставки.

Для моделирования оперативности доставки информации с использованием нескольких наземных станций необходимо:

1. Определить моменты видимости для каждой наземной станции g :

$$T_{visibility}^g = \left\{ (t_{start}^{g,i}, t_{end}^{g,i}) \mid i = 1, 2, \dots, N_{passes}^g \right\},$$

где $(t_{start}^{g,i}, t_{end}^{g,i})$ – интервал времени i -го пролёта КА над станцией g , N_{passes}^g – количество пролётов над станцией g за рассматриваемый период.

2. Объединить все интервалы видимости в общий набор, упорядоченный по времени начала интервала:

$$T_{visibility}^{all} = \bigcup_{g=1}^{N_{stations}} T_{visibility}^g,$$

3. Выполнить моделирование передачи данных с учётом ограничений каждой станции:

- приоритеты передачи (по времени съёмки, важности объекта и т.д.);
- ограничения по объёму данных, принимаемых каждой станцией;
- возможность частичной передачи данных (разделение данных между несколькими станциями);

4. Рассчитать оперативность доставки для каждого участка съёмки:

$$T_{delivery}^j = t_{downlink}^j - t_{imaging}^j,$$

где $t_{downlink}^j$ – момент времени, когда данные для j-го участка были полностью переданы на наземную станцию.

2.4 Выводы по второй главе

В данной главе представлен разработанная методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ, для обеспечения практического применения предложенного подхода были разработаны следующие методики, алгоритмы и модели:

1. Методика выбора оптимального географического расположения наземных станций, которая позволяет определить минимально необходимое количество наземных станций и их оптимальное расположение с учётом параметров орбитальной группировки, характеристик бортовой и наземной аппаратуры, а также географических, политических и инфраструктурных ограничений. Методика включает алгоритмы моделирования движения КА, формирования множества станций-кандидатов, расчёта временных интервалов радиовидимости и решения задачи выбора минимального количества НППИ с использованием жадного алгоритма.

2. Имитационная модель для оценки ключевых показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ, которая позволяет оценивать периодичность наблюдения различных участков земной поверхности, моделировать информационные потоки, генерируемые целевой аппаратурой, и оценивать оперативность доставки информации на наземные станции. Модель учитывает характеристики целевой аппаратуры, параметры

орбит, режимы работы КА, ограничения по энергетике и бортовой памяти, а также особенности функционирования наземных станций.

Глава 3. Разработка программного комплекса для моделирования систем ДЗЗ

Для практической реализации методики оценки функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ, представленной в предыдущей главе, необходим специализированный программный комплекс, позволяющий выполнять моделирование сложных орбитальных структур, оценивать их эффективность и оптимизировать параметры с учётом особенностей наземной инфраструктуры. В настоящей главе представлено описание разработанного программного комплекса, его архитектуры, алгоритмического обеспечения и основных функциональных возможностей.

3.1 Алгоритм и структура программного обеспечения

Разработанный программный комплекс представляет собой инструментальное средство для оценки эффективности функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ. В основу алгоритмической структуры программного комплекса легли результаты исследований, изложенных в предыдущих главах. Ниже представлены основные положения разработанного алгоритма:

1. Осуществляется определение подходящей модели оптико-электронной аппаратуры КА посредством последовательного выбора области решаемой задачи дистанционного зондирования Земли, наименования задачи и уровня детальности наблюдения. В результате формируется список подходящих ОЭА, удовлетворяющих требованиям решаемой задачи по характеристикам масштаба, разрешения и состава спектральных диапазонов [76].

2. Задаётся состав бортовых систем КА [77]. Для каждого блока бортовой аппаратуры (БА) присутствует возможность выбора уже разработанного изделия или задания характеристик вновь разрабатываемого, в случае если находящиеся в базе данных блоки БА не удовлетворяют требованиям заказчика. О каждом блоке БА и бортовой системы в модуль расчёта характеристик КА передаются следующие параметры: масса, плотность, объем, момент инерции, а также

характерные параметры, такие как объем памяти, ширина полосы захвата, разрешение и т.д.

3. Осуществляется расчёт основных характеристик проектируемого КА, включающих в себя массу, объем, момент инерции, энергопотребление, длину, диаметр. При выявлении несоответствия полученных характеристик требуемым, присутствует возможность изменения состава бортовых систем КА и параметров БА, и последующего пересчёта характеристик КА.

4. Задаются параметры космической системы мониторинга, которые включают в себя количество КА, срок активного существования КА, продолжительность работы ОЭА на одном витке орбиты, минимальную высоту Солнца над горизонтом во время съёмки, максимально допустимый угол отклонения КА во время съёмки, время подготовки изображения к отправке на наземный пункт приёма информации [78].

5. Происходит автоматический выбор средства выведения в соответствии с количеством КА, их массой и объёмом.

6. Задаются географические координаты и наименования наземных комплексов приёма информации космической системы мониторинга.

7. Задаются географические координаты и наименования объектов наблюдения космической системы мониторинга.

8. Происходит выбор орбиты КА из списка доступных орбит или создаётся новая орбита, для которой необходимо задать следующие параметры: высоту перигея, высоту апогея, наклонение, долготу восходящего узла, аргумент перигея и дату запуска.

9. Происходит имитационное моделирование космической системы мониторинга, в результате которой вычисляются следующие параметры: усреднённая периодичность, усреднённая оперативность, суммарная отснятая площадь поверхности Земли, максимальное время между снимками, число переданных снимков и время нахождения КА на орбите.

10. Выбор и расчёт показателя функционирования космической системы наблюдения. В случае выявления несоответствия рассчитываемых показателей

требуемым, присутствует возможность вернуться на любой из этапов выбора ОЭА, задания характеристик бортовых систем КА, выбора параметров космической системы мониторинга, орбиты КА, и повторить имитационное моделирование. После каждого этапа вычисления показателей функционирования космической системы мониторинга присутствует возможность формирования протокола результатов расчёта характеристик системы. Полученный протокол служит основой для составления тактико-технического задания на создаваемую космическую систему мониторинга.

Таким образом, алгоритм программного обеспечения реализует итеративный подход к проектированию космической системы мониторинга, позволяющий последовательно уточнять параметры системы для достижения требуемых показателей функционирования. Итеративный характер алгоритма обеспечивает возможность оперативного перехода между этапами проектирования при выявлении несоответствий и быстрого пересчёта характеристик системы при изменении исходных данных. Это особенно важно на ранних стадиях проектирования, когда требуется рассмотрение множества альтернативных вариантов построения системы.

Особенностью разработанного алгоритма является комплексный учёт характеристик как орбитальной группировки, так и наземной инфраструктуры, что позволяет оценивать эффективность функционирования системы в целом, а не отдельных её компонентов. Такой подход соответствует системно-аналитической методике, предложенной в предыдущей главе, и обеспечивает возможность поиска оптимального баланса между параметрами орбитальной группировки и наземного сегмента. Алгоритм реализации этапов автоматизированного выбора основных проектных параметров космической системы мониторинга приведён на рисунке 3.1.

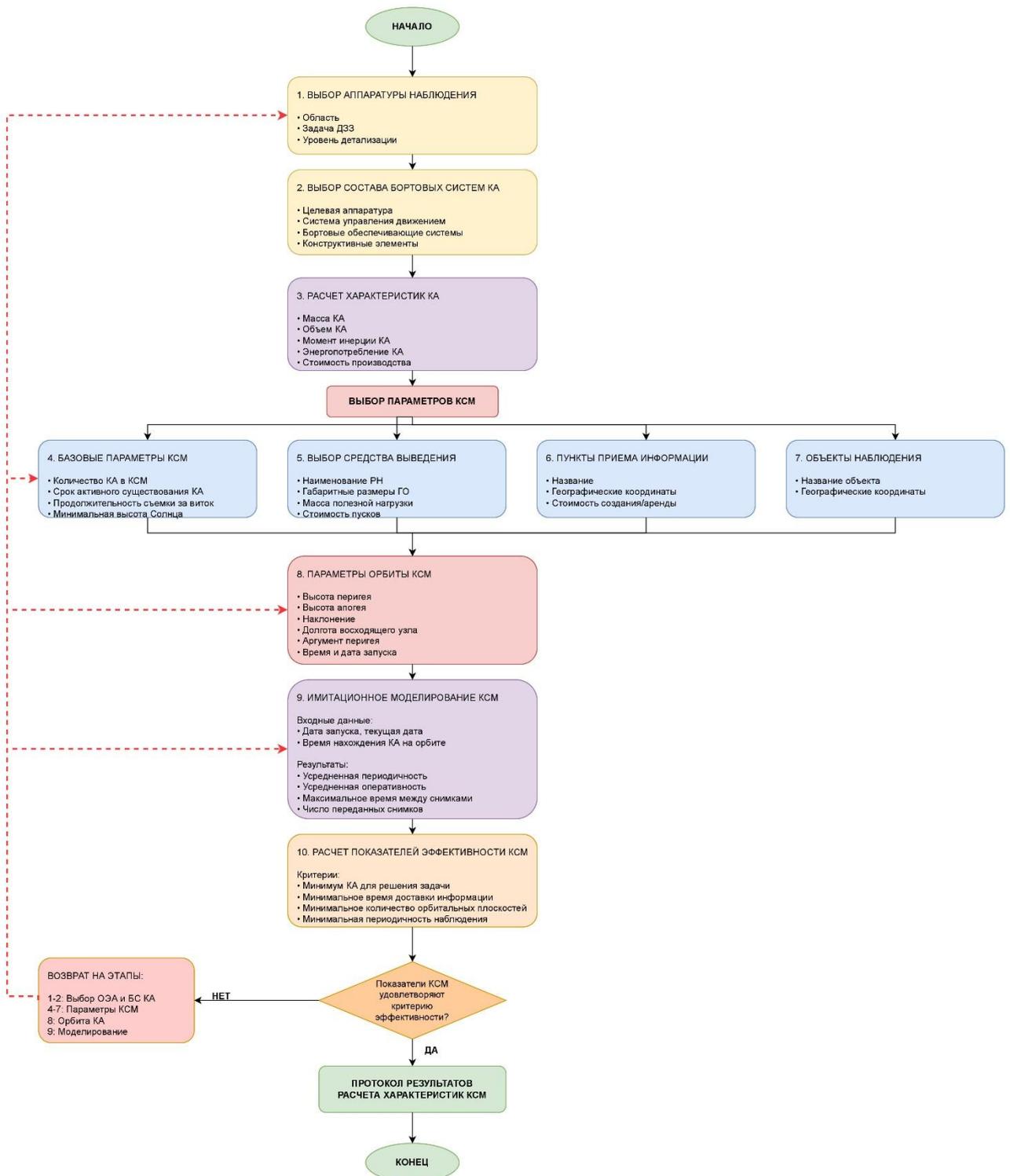


Рисунок 3.1 – Алгоритм автоматизированного выбора основных проектных параметров космической системы мониторинга

Важным аспектом алгоритма является возможность моделирования различных сценариев функционирования космической системы ДЗЗ, учитывающих реальные условия эксплуатации: периоды видимости наземных станций, освещённость наблюдаемых территорий, ограничения на работу бортовой аппаратуры, что позволяет получить более достоверные оценки эффективности системы.

3.2 Описание программных модулей

Программный комплекс построен по модульному принципу, что обеспечивает гибкость в использовании и возможность расширения функциональности. Взаимодействие между модулями осуществляется через унифицированные интерфейсы, что позволяет независимо разрабатывать и тестировать отдельные компоненты системы.

Структура программного комплекса включает следующие основные модули:

- модуль выбора проектных параметров космических аппаратов, на базе которых строится многоспутниковая космическая система;
- модуль выбора проектных характеристик системы;
- модуль моделирования целевого функционирования многоспутниковых систем;
- модуль оценки эффективности функционирования разработанной системы.

На рисунке 3.2 приведена схема переходов между основными графическими компонентами программного обеспечения.

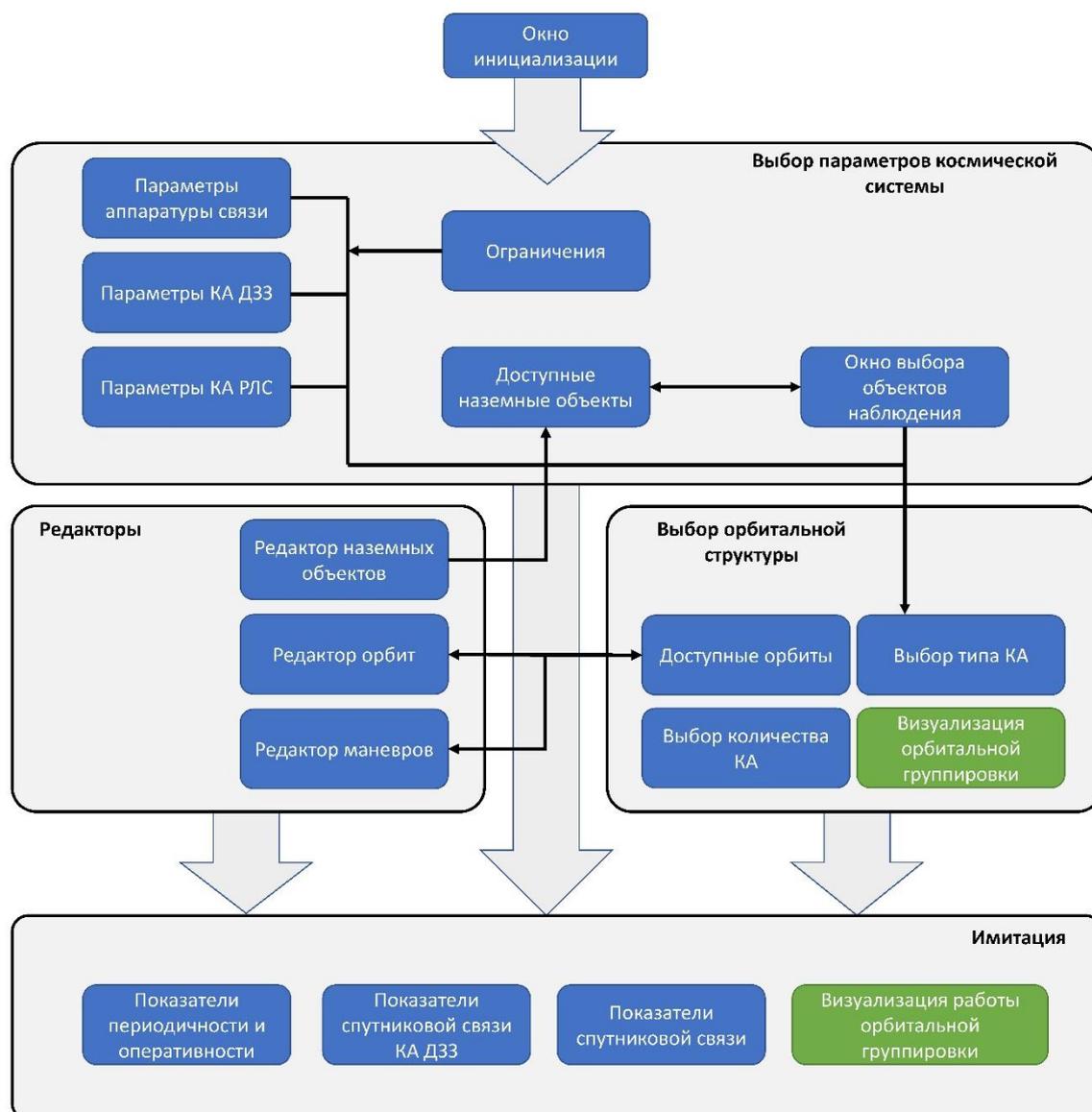


Рисунок 3.2 – Взаимосвязь модулей программного комплекса

3.2.1 Модуль выбора проектных параметров космических аппаратов

Модуль выбора проектных параметров космических аппаратов предназначен для определения характеристик КА, входящих в состав многоспутниковой системы. Графическое представление окна модуля представлено на рисунке 3.3.

Параметры аппаратуры связи	
Макс. кол-во спутников в цепочке связи	<input type="text" value="5"/>
Макс. расстояние на котором возможна связь между КА, км	<input type="text" value="10000"/>
Мин. доступная высота для линии связи (H _{гар}), км	<input type="text" value="180"/>
Макс. кол-во одновременно установленных сеансов связи с НУС	<input type="text" value="3"/>
Параметры оптических КА	
Мин. угол солнца над горизонтом для съемки, °	<input type="text" value="10"/>
Ширина полосы захвата, км	<input type="text" value="20"/>
Макс. угол отклонения КА, °	<input type="text" value="25"/>
Пространственное разрешение, м	<input type="text" value="1"/>
Макс. кол-во снимков "на борту"	<input type="text" value="5000"/>
Параметры РЛС КА	
Ширина полосы захвата, км	<input type="text" value="20"/>
Макс. угол падения КА, °	<input type="text" value="45"/>
Пространственное разрешение, м	<input type="text" value="1"/>
Диапазон частот, Гц	<input type="text" value="100-200"/>
Макс. кол-во снимков "на борту"	<input type="text" value="5000"/>

Рисунок 3.3 – Модуль выбора проектных параметров космических аппаратов

Модуль реализуется с помощью нескольких специализированных интерфейсов, каждый из которых отвечает за определённый тип аппаратуры:

Интерфейс ввода параметров аппаратуры связи. Данный интерфейс позволяет задать характеристики радиотехнического комплекса КА, обеспечивающего передачу данных между спутниками и наземными пунктами, а также характеристики межспутниковой связи. В интерфейсе задаются следующие параметры:

- максимальное количество спутников в цепочке связи;
- максимальное расстояние, на котором возможно установить межспутниковую связь;
- минимальная высота над Землёй, после которой возможно установить межспутниковую связь;
- максимальное количество одновременно установленных сеансов с наземными узлами связи (НУС).

Интерфейс выбора параметров оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) КА. Этот интерфейс позволяет задать характеристики целевой аппаратуры

космических аппаратов наблюдения, работающих в оптическом диапазоне.

Задаются следующие параметры:

- минимальный угол Солнца над горизонтом, при котором космический аппарат может проводить съёмку;
- ширина полосы захвата оптической аппаратуры;
- максимальный угол отклонения космического аппарата;
- пространственное разрешение целевой аппаратуры;
- максимальное количество снимков, которое может вместить бортовое запоминающее устройство.

Интерфейс выбора параметров радиолокационной аппаратуры. Данный интерфейс предназначен для задания характеристик радиолокационной аппаратуры КА. Определяются следующие параметры:

- ширина полосы захвата;
- максимальный угол отклонения космического аппарата;
- пространственное разрешение;
- диапазон частот;
- максимальное количество снимков, которое может вместить бортовое запоминающее устройство.

Данные, формируемые в этих интерфейсах, используются в моделях при расчёте показателей эффективности функционирования соответствующих космических систем. Модуль обеспечивает ввод параметров и их первичную проверку на соответствие физическим ограничениям и техническим возможностям, что позволяет исключить заведомо нереализуемые варианты на раннем этапе проектирования.

В функционал модуля входит возможность выбора как из каталога существующих образцов аппаратуры, так и задания параметров для перспективных разработок, что позволяет использовать ПО как при проектировании как текущих, так и перспективных космических систем.

3.2.2 Модуль выбора проектных характеристик многоспутниковой системы

Модуль выбора проектных характеристик многоспутниковой системы предназначен для определения параметров всей космической системы в целом и реализуется с помощью следующих интерфейсов:

Интерфейс ввода ограничений на съёмку и передачу данных. В этом интерфейсе задаются временные ограничения, определяющие логику работы бортовой аппаратуры космических аппаратов спутниковой системы:

- задержка между съёмкой двух объектов;
- задержка между передачами данных;
- задержка перед передачей данных после съёмки;
- задержка перед съёмкой после передачи данных;
- задержка между съёмкой одного и того же объекта;
- задержка между передачами данных для одного объекта;
- задержка перед съёмкой после передачи данных одного и того же объекта;
- задержка перед отправкой данных после съёмки одного и того же объекта.

Интерфейс выбора доступных наземных объектов (рисунок 3.4).

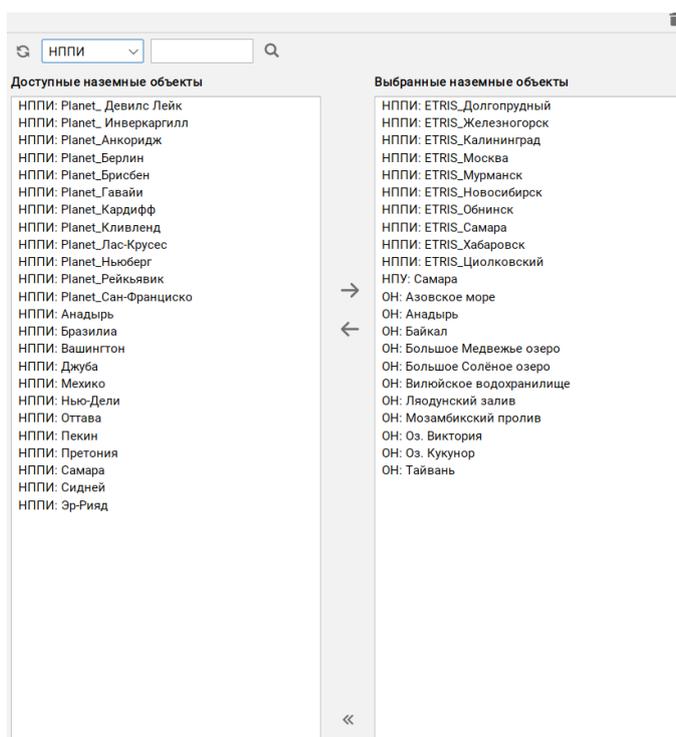


Рисунок 3.4 – Интерфейс выбора доступных наземных объектов

В данном интерфейсе пользователь может сформировать состав наземных объектов, с которыми будет взаимодействовать космическая система:

- объекты наблюдения - географические точки или районы, для которых требуется получение данных ДЗЗ;
- наземные пункты приема информации (НППИ) - станции, обеспечивающие прием данных с космических аппаратов;
- наземные узлы связи (НУС) - абоненты, между которыми осуществляется информационный обмен через космическую систему;
- наземные пункты управления (НПУ) - станции, обеспечивающие управление космическими аппаратами.

Интерфейс задания орбитальной структуры космической системы (рисунок 3.5). В данном интерфейсе осуществляется выбор доступных орбит, для которых затем назначается тип и количество КА. Этот интерфейс является ключевым для определения орбитальной структуры многоспутниковой системы.

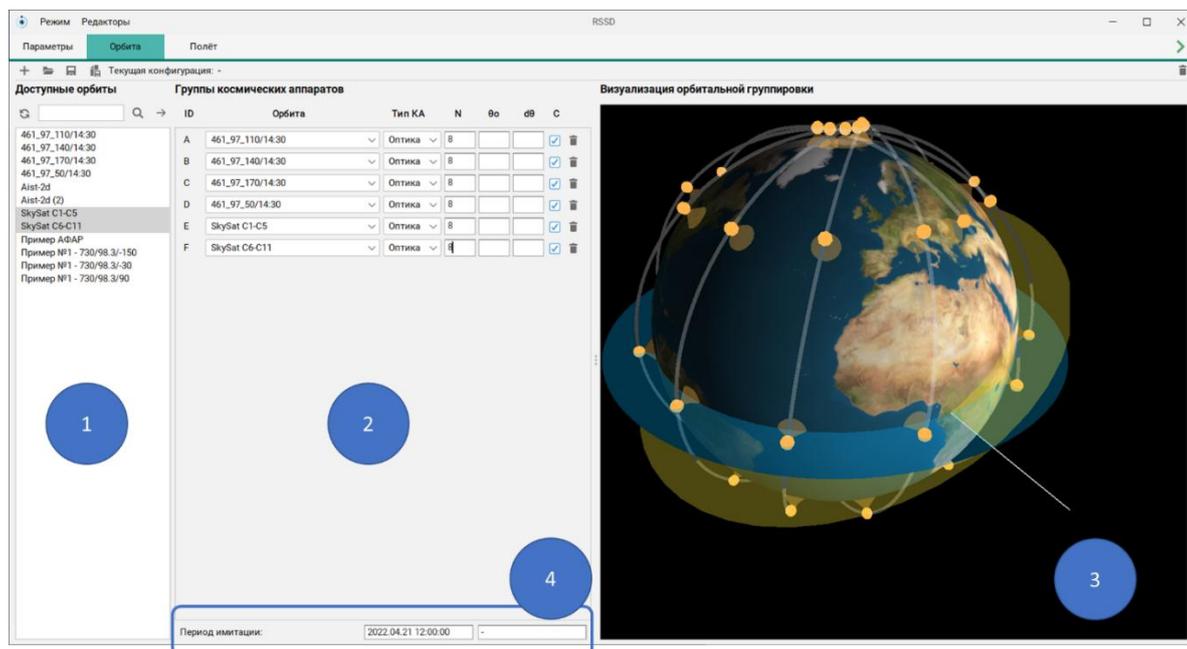


Рисунок 3.5 – Интерфейс задания орбитальной структуры космической системы

Окно данного интерфейса состоит из нескольких областей:

- 1) перечень доступных орбит. Здесь пользователь должен выбрать нужные орбиты и передать их в следующую область;
- 2) группы космических аппаратов. В этой области для каждой выбранной орбиты пользователь должен выбрать тип и количество космических аппаратов (рисунок 3.6), которые будут на ней находиться. Пользователь может задать аргумент широты первого КА в группировке, а также угловое расстояние между КА группировке. Помимо прочего пользователь может определить установлено ли на спутниках группировки оборудование для межспутниковой связи, для этого пользователю необходимо поставить «галочку» в соответствующей ячейке;
- 3) визуализация орбитальной группировки. В этой области отображается космическая система с заданными параметрами;
- 4) окно ввода периода имитации. В этой области пользователь может задать начало и конец моделирования.

Группы космических аппаратов

ID	Орбита	Тип КА	N	θ_0	$d\theta$	C
A	461_97_110/14:30	Оптика	8			<input checked="" type="checkbox"/>
B	461_97_140/14:30	Оптика	8			<input checked="" type="checkbox"/>
C	461_97_170/14:30	Оптика	8			<input checked="" type="checkbox"/>
D	461_97_50/14:30	Оптика	8			<input checked="" type="checkbox"/>
E	SkySat C1-C5	Оптика	8			<input checked="" type="checkbox"/>
F	SkySat C6-C11	Оптика	8			<input checked="" type="checkbox"/>
	461_97_110/14:30	РЛС				
	461_97_140/14:30	Связь				
	461_97_170/14:30					
	461_97_50/14:30					
	Aist-2d					
	Aist-2d (2)					
	SkySat C1-C5					
	SkySat C6-C11					
	Пример АФАР					
	Пример №1 - 730/98.3/-150					
	Пример №1 - 730/98.3/-30					
	Пример №1 - 730/98.3/90					

Период имитации: 2022.04.21 12:00:00 -

Рисунок 3.6 – Область группы космических аппаратов

В области визуализации (рисунок 3.7): 1 – это плоскости выбранных орбит, 2 – плоскость орбиты Солнца, 3 – плоскость экватора Земли, 4 – направление на Солнце, 5 – оранжевыми точками показаны космические аппараты.

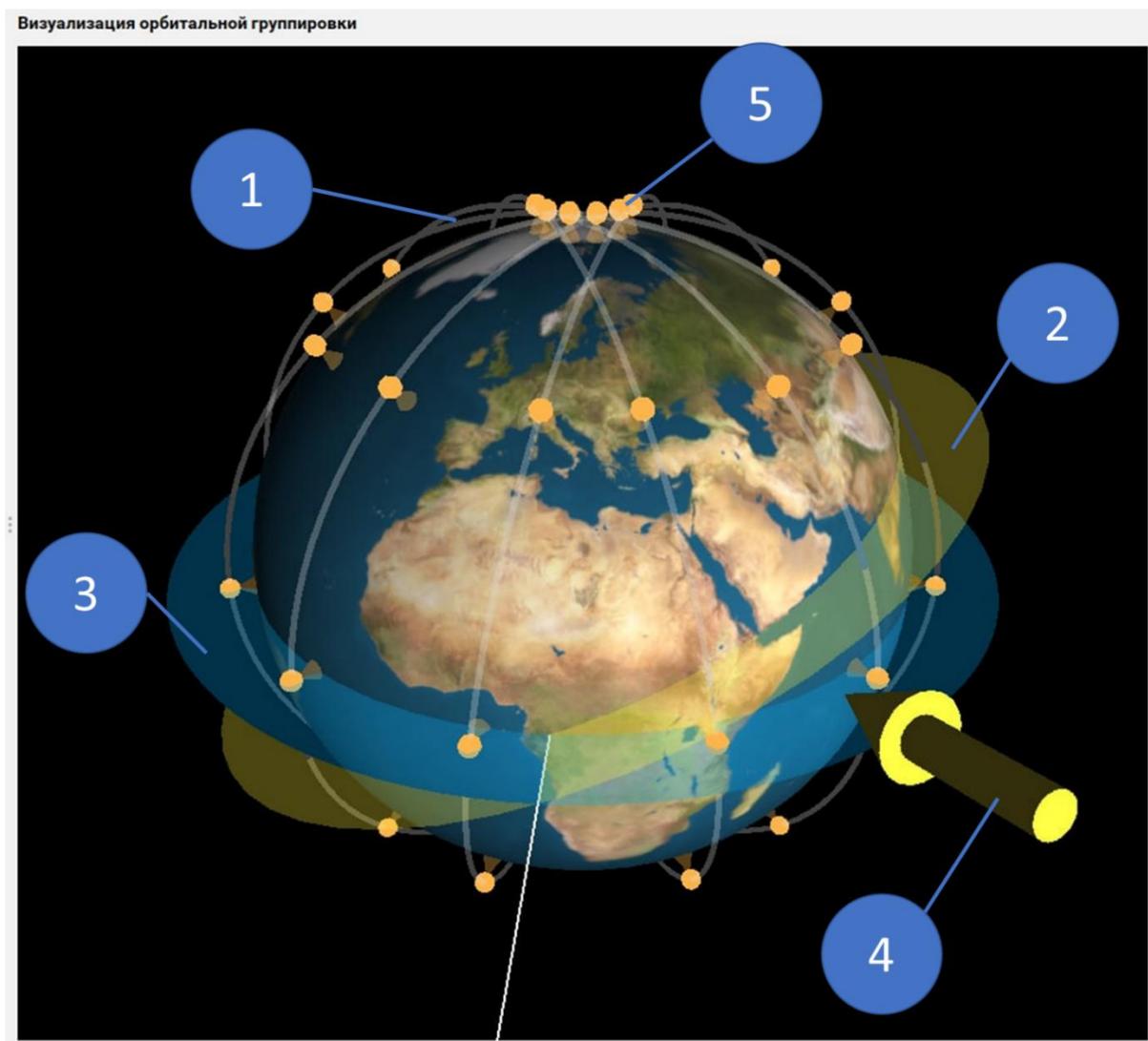


Рисунок 3.7 – Область визуализации орбитальной группировки

Таким образом, модуль обеспечивает комплексное задание параметров космической системы, учитывающих как орбитальную, так и наземную составляющие.

Модуль позволяет задавать как типовые, так и специализированные конфигурации космических систем, что обеспечивает возможность проектирования систем различного назначения и масштаба. Предусмотрена возможность сохранения и загрузки конфигураций, что упрощает работу с типовыми проектами и обеспечивает возможность сравнительного анализа различных вариантов построения системы.

3.2.3 Модуль моделирования целевого функционирования многоспутниковых систем

Модуль моделирования целевого функционирования многоспутниковых систем является центральным элементом программного комплекса, обеспечивающим выполнение имитационного моделирования работы космической системы с заданными параметрами. Модуль реализуется с помощью интерфейса имитационного моделирования, включающего в себя визуализацию процесса моделирования и отображение результатов в реальном времени (рисунок 3.8).

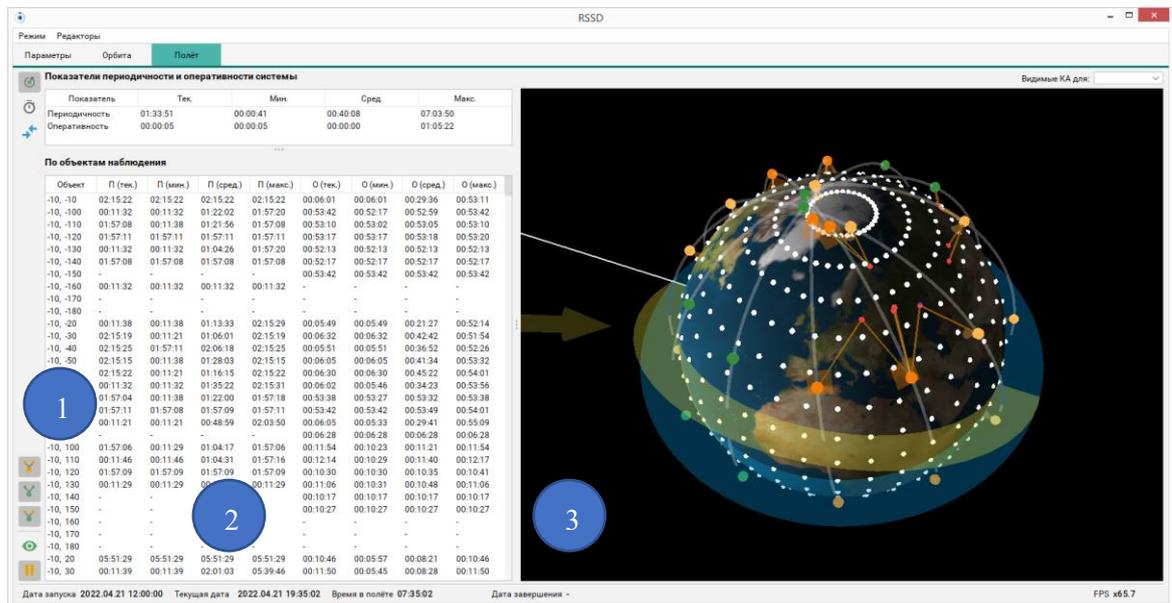


Рисунок 3.8 – Интерфейс моделирования функционирования космических систем

В основе модуля лежат алгоритмы расчёта зон видимости и оптимизации расписания сеансов связи.

Структура интерфейса (рисунок 3.8) организована в три функциональные области:

1. Панель управления, обеспечивающая выбор отображаемых показателей эффективности, конфигурацию параметров межспутниковой связи и инициализацию процесса моделирования.
2. Аналитическая область, предназначенная для визуализации табличных данных и графиков выбранных метрик.

3. Область трёхмерной визуализации, воспроизводящая работу космической системы с возможностью интерактивного управления (масштабирование, вращение) как до начала, так и в ходе моделирования.

Область трёхмерной визуализации (рисунок 3.9) обеспечивает визуализацию следующих элементов в процессе моделирования:

- трёхмерная модель Земли с нанесёнными на неё объектами (НППИ, НУС, НПУ, объекты наблюдения);
- орбиты и положение космических аппаратов;
- зоны обзора целевой аппаратуры КА;
- зоны радиовидимости наземных станций;
- линии связи между КА и наземными объектами, а также между КА в случае межспутниковой связи.

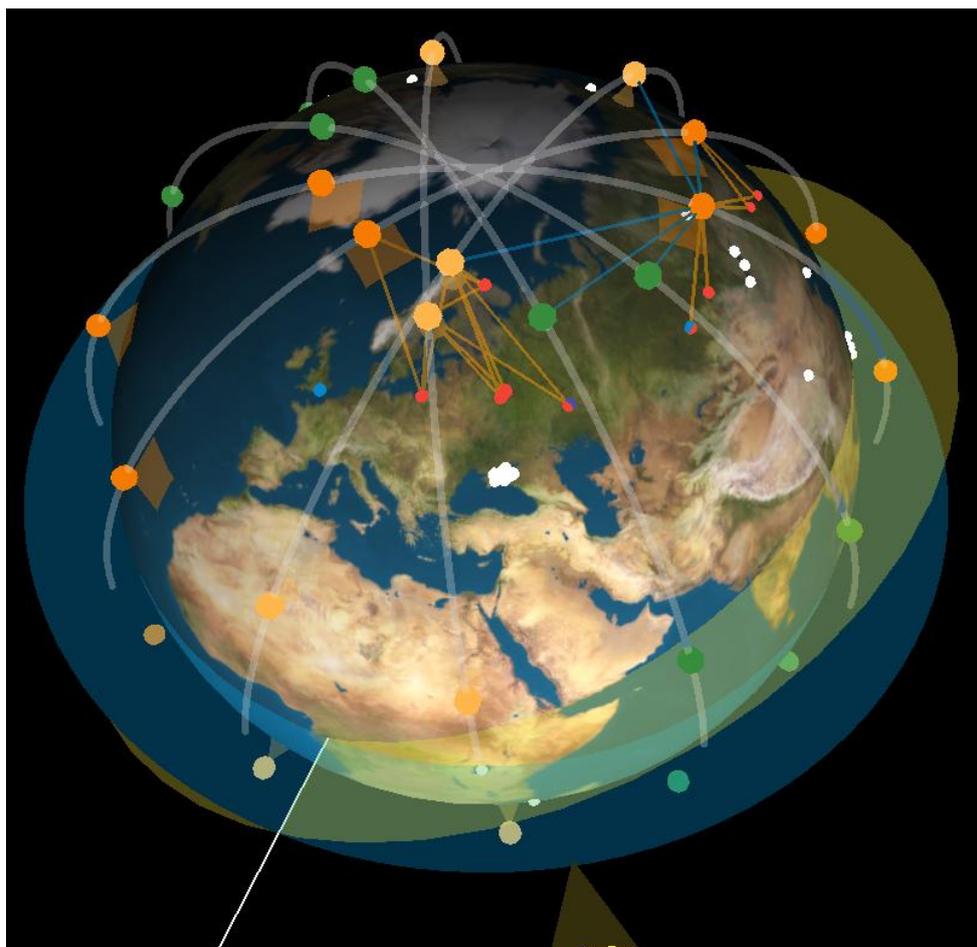


Рисунок 3.9 – Область трёхмерной визуализации работы космической системы в процессе моделирования

Цветовая кодировка элементов обеспечивает наглядность представления информации:

- красными точками отображаются НППИ;
- белыми точками отображаются объекты наблюдения;
- белыми зонами выделяются интересующие зоны наблюдения;
- синими точками – наземные пункты управления; голубыми точками – НУС;
- КА ДЗЗ с оптико-электронной аппаратурой отображаются оранжевыми точками, КА с радиолокационной аппаратурой – зелёными точками;
- оранжевые линии отображают вектор между КА и НППИ, когда КА находится в зоне радиовидимости;
- голубые линии отображают вектор между КА, между которыми возможна установка связи.

Для КА ДЗЗ, оснащённых оптико-электронной аппаратурой, программный комплекс отображает зону обзора в виде конуса, а для КА с радиолокационной аппаратурой – в виде усечённой пирамиды, что соответствует физическим принципам работы соответствующей аппаратуры.

Модуль позволяет выполнять моделирование как в ускоренном режиме для быстрой оценки интегральных показателей эффективности, так и в режиме реального времени для детального изучения взаимодействия элементов системы. Предусмотрена возможность остановки моделирования, изменения параметров и продолжения с учётом внесённых изменений.

3.2.4 Модуль оценки показателей функционирования разработанной системы

Модуль оценки показателей функционирования разработанной системы предназначен для расчёта и представления различных показателей эффективности космической системы на основе результатов имитационного моделирования.

Модуль предоставляет для анализа следующие группы показателей:

1. Показатели периодичности и оперативности наблюдения (рисунок 3.10):

- системные агрегированные данные (текущие, минимальные, средние и максимальные значения);
- детализация по объектам наблюдения с аналогичными статистическими параметрами.

Показатели периодичности и оперативности системы								
Показатель	Тек.	Мин.	Сред.	Макс.				
Периодичность	00:11:41	00:00:09	01:11:24	14:42:44				
Оперативность	00:11:25	00:00:05	00:13:21	13:11:30				

По объектам наблюдения								
Объект	П (тек.)	П (мин.)	П (сред.)	П (макс.)	О (тек.)	О (мин.)	О (сред.)	О (макс.)
Азовское море	01:57:08	01:57:08	01:57:10	01:57:12	01:56:53	00:11:50	00:46:53	01:56:53
Анадырь	00:11:42	00:00:51	00:32:44	01:44:37	00:00:05	00:00:05	00:00:05	00:00:05
Байкал	00:11:41	00:11:41	03:01:37	13:11:35	00:11:25	00:01:01	02:14:01	13:11:30
Большое Медвежье озеро	01:34:21	00:00:09	00:37:00	01:45:39	00:00:05	00:00:05	00:00:05	00:00:05
Большое Солёное озеро	00:11:50	00:11:24	01:02:17	01:57:14	00:00:05	00:00:05	00:00:07	00:00:25
Вилуйское водохранилище	00:09:51	00:01:47	00:33:25	01:45:46	00:00:05	00:00:05	00:00:05	00:00:05
Ляодунский залив	00:11:38	00:11:29	00:41:43	01:45:32	00:00:05	00:00:05	00:00:05	00:00:05
Мозамбикский пролив	01:57:12	01:57:12	01:57:12	01:57:12	00:11:37	00:01:47	00:06:42	00:11:37
Оз. Виктория	02:08:54	01:45:33	01:57:13	02:08:54	00:03:14	00:01:40	00:02:13	00:03:14
Оз. Кукунор	00:11:34	00:11:34	05:37:12	14:42:44	00:00:05	00:00:05	00:00:05	00:00:05
Тайвань	01:46:06	01:46:06	01:51:40	01:57:15	00:00:53	00:00:53	00:01:18	00:01:33

Рисунок 3.10 – Показатели периодичности и оперативности наблюдения

2. Показатели эффективности функционирования наземных пунктов приёма информации (рисунок 3.11):

- общее количество проведённых сеансов связи;
- общее количество принятых снимков;
- объем принятой информации;
- коэффициент загрузки НППИ.

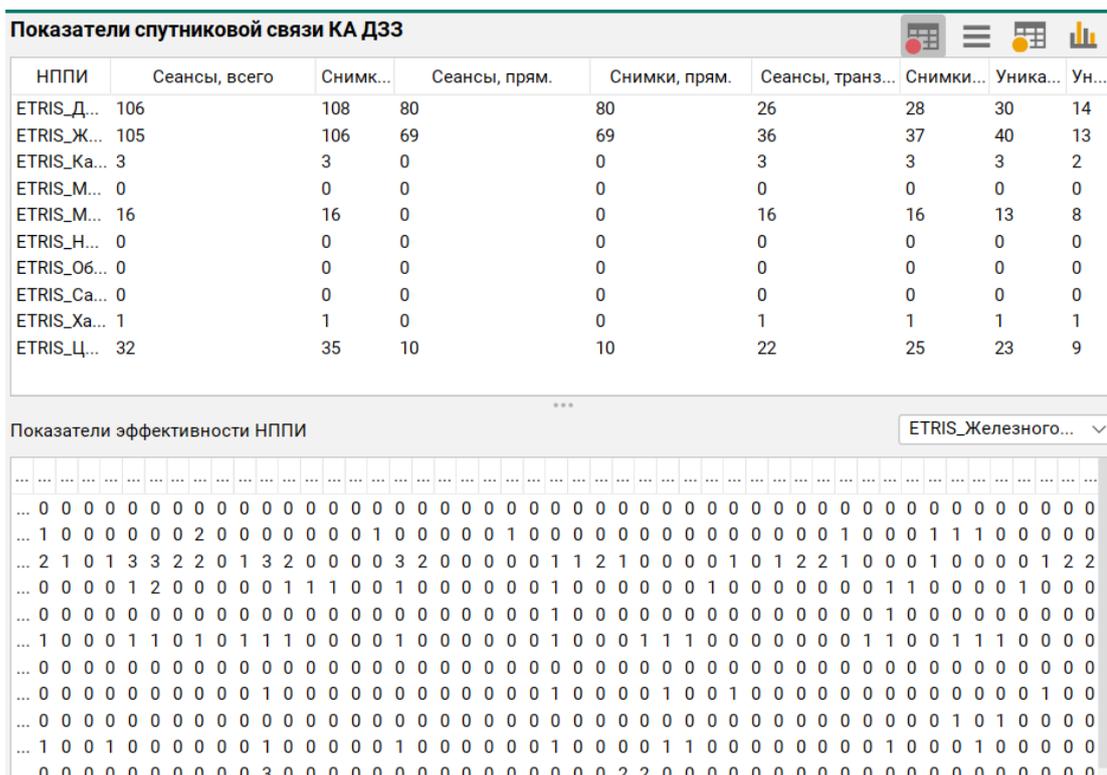


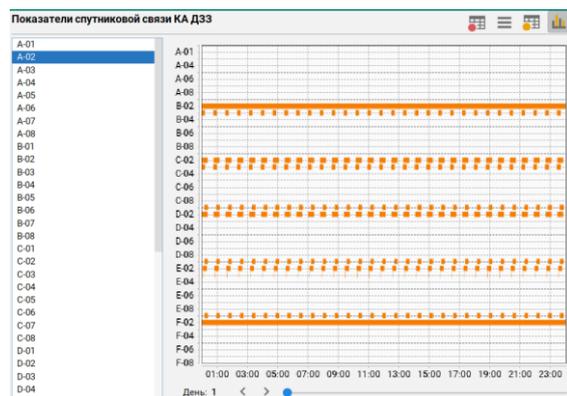
Рисунок 3.11 – Показатели функционирования НППИ космической системы наблюдения

3. Показатели взаимной видимости космических аппаратов:

- таблицы взаимной видимости КА по типу “каждый с каждым” (рисунок 3.12а);
- диаграммы Ганта, отображающие периоды видимости между выбранным КА и другими КА группировки (рисунок 3.12б).

Показатели спутниковой связи КА ДЗЗ

КА-1	КА-2	Прод. (тек.)	Прод. (мин.)	Прод. (сред.)	Прод. (макс.)	Прод. (сум.)	Прод. (отн.)
A-01	A-03	-	-	-	-	-	0%
A-01	A-08	-	-	-	-	-	0%
A-01	B-01	23:59:59	23:59:59	23:59:59	23:59:59	37:15:50	100%
A-01	B-02	00:13:39	00:13:38	00:13:38	00:13:39	10:55:04	29,3%
A-01	B-03	-	-	-	-	-	0%
A-01	B-04	-	-	-	-	-	0%
A-01	B-05	-	-	-	-	-	0%
A-01	B-06	-	-	-	-	-	0%
A-01	B-07	-	-	-	-	-	0%
A-01	B-08	-	-	-	-	-	0%
A-01	E-01	00:15:42	00:15:42	00:15:42	00:15:43	12:34:02	33,72%
A-01	E-02	00:01:21	00:01:11	00:01:15	00:01:21	01:00:46	2,72%
A-01	E-03	-	-	-	-	-	0%
A-01	E-04	-	-	-	-	-	0%
A-01	E-05	-	-	-	-	-	0%
A-01	E-06	-	-	-	-	-	0%
A-01	E-07	-	-	-	-	-	0%
A-01	E-08	00:13:25	00:01:56	00:13:08	00:13:26	10:41:41	28,7%
A-01	F-01	23:59:59	23:59:59	23:59:59	23:59:59	37:15:50	100%
A-01	F-02	-	-	-	-	-	0%
A-01	F-03	-	-	-	-	-	0%
A-01	F-04	-	-	-	-	-	0%
A-01	F-05	-	-	-	-	-	0%
A-01	F-06	-	-	-	-	-	0%



а)

б)

Рисунок 3.12 – Показатели взаимной видимости КА

4. Показатели функционирования космических систем связи (рисунок 3.13):

- показатели передачи данных между наземными узлами связи;

- показатели доступности связи между НУС с помощью спутниковой системы;
- показатели межспутниковой связи.

НУС-1	НУС-2	Сеансов	Прод. (тек.)	Прод. (ми...)	Прод. (сре...)	Прод. (мак...)	Прод. (сум.)	Прод. (отн.)
Богота	Лондон	0	-	-	-	-	-	0%
Богота	Новосиби...	0	-	-	-	-	-	0%
Богота	Сантьяго	675	00:00:05	00:00:01	00:00:44	00:01:06	08:15:57	1.31%
Лондон	Новосиби...	463	00:01:33	00:00:14	00:04:23	00:06:37	33:51:46	5.38%
Лондон	Сантьяго	0	-	-	-	-	-	0%
Новосиби...	Сантьяго	0	-	-	-	-	-	0%

Рисунок 3.13 – Показатели передачи данных между наземными узлами связи

Модуль позволяет представлять результаты в различных форматах (таблицы, графики, диаграммы, тепловые карты), что обеспечивает наглядность и удобство анализа данных. Предусмотрена возможность экспорта результатов в различные форматы для дальнейшей обработки и анализа.

Модуль позволяет не только рассчитывать интегральные показатели функционирования для системы в целом, но и детально анализировать показатели функционирования отдельных компонентов и подсистем для выявления узких мест и оптимизации параметров системы.

3.3 Выводы по третьей главе

В данной главе был представлен разработанный программный комплекс для моделирования систем ДЗЗ, реализующий предложенную в предыдущей главе методику оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли.

Ключевые результаты, полученные в ходе разработки программного комплекса, включают:

1. Разработан и реализован алгоритм автоматизированного выбора основных проектных параметров космической системы мониторинга,

обеспечивающего итеративное уточнение параметров системы для достижения требуемых показателей функционирования.

2. Создана модульная архитектура программного комплекса, включающая модули выбора проектных параметров КА, выбора проектных характеристик системы, моделирования целевого функционирования и оценки эффективности, что обеспечивает гибкость использования и возможность расширения функциональности.

Разработанный программный комплекс обладает следующими преимуществами: интегрированный подход к моделированию всех аспектов работы многоспутниковой системы ДЗЗ, включая орбитальную группировку, целевую аппаратуру, наземную инфраструктуру и информационное взаимодействие; возможность моделирования систем различного масштаба и назначения, от специализированных космических аппаратов до глобальных многоспутниковых группировок; наглядная визуализация процесса моделирования и результатов в различных форматах, графики, диаграммы и таблицы; возможность экспорта результатов для дальнейшего анализа и использования в других системах.

Программный комплекс может использоваться на всех этапах проектирования многоспутниковых систем ДЗЗ: от предварительного анализа и выбора основных параметров до детального моделирования и оптимизации режимов функционирования.

Практическая апробация программного комплекса на примере моделирования перспективных многоспутниковых систем ДЗЗ, результаты которой будут представлены в следующей главе, подтвердила его эффективность и достоверность получаемых результатов.

Глава 4. Выбор проектных параметров и оценка показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ

В данной главе проводится оценка показателей функционирования многоспутниковых группировок дистанционного зондирования Земли с помощью предложенной методики и программного комплекса. Основное внимание уделяется анализу проектных параметров информационного тракта, выбору оптимальных орбитальных параметров и оценке эффективности функционирования группировки по критериям периодичности наблюдения и оперативности доставки информации на наземные пункты приёма.

4.1 Постановка задачи создания космической системы квазинепрерывного глобального обзора со сверхвысоким пространственным разрешением

В области дистанционного зондирования Земли с помощью космических аппаратов (КА) с оптико-электронной аппаратурой наблюдения увеличивается потребность в снимках со сверхвысоким (менее 1,0 м) пространственным разрешением. Одним из вариантов достижения такого разрешения является существенное снижение высоты рабочей орбиты (до сверхнизких орбит в диапазоне высот от 200 км до 400 км). При этом без увеличения массогабаритных размеров телескопического комплекса можно улучшить пространственное разрешение космических снимков [79, 80]. В проектах КА для сверхнизкоорбитального наблюдения Земли рассматриваются многоспутниковые группировки малых КА ДЗЗ. То есть снижаются проектные показатели массы и высоты орбиты единичного КА для достижения сверхвысокого пространственного разрешения, а показатели производительности наблюдения достигаются большим количеством спутников в группировке (десятки единиц в группировке). В качестве примера можно привести проект (уже близкий к практической реализации) сверхнизкоорбитальной (на высотах 260 ÷ 280 км) спутниковой группировки дистанционного зондирования Земли компании Earth Observant (США). Орбитальная группировка включает в свой состав порядка 60 спутников радиолокационного наблюдения с массой около 300 кг [81]. Указанное количество

КА позволяет рассчитывать на квазинепрерывную периодичность наблюдения заданных районов Земли с ультравысоким пространственным разрешением.

Таким образом задача настоящего раздела формулируется следующим образом: провести анализ проектных параметров и оценку показателей функционирования многоспутниковой группировки ДЗЗ, работающей на околокруговых орбитах с высотой от 250 км до 350 км. В качестве основной полезной нагрузки для КА группировки рассматривается оптико-электронная аппаратура, характеристики которой приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Проектные параметры рассматриваемой ОЭА

Параметр	Значение
Эквивалентное фокусное расстояние системы ($F_{\text{экв}}$), м	10
Угол поля зрения телескопа (2α), град	1,5
Спектральный диапазон ПХ, мкм	0,45-0,80
Разрядность аналогово-цифрового преобразователя (b), бит	10
Размер пикселя ПЗС элемента ($X \times Y$), мкм	7x7
Длина ПЗС линейки ($L_{\text{ПЗС}}$), мм	260

4.2 Анализ проектных параметров целевого информационного тракта космического аппарата дистанционного зондирования Земли

Космический аппарат дистанционного зондирования Земли в процессе своего целевого функционирования обеспечивает накопление информации, которую генерирует съёмочная аппаратура. В настоящей работе в качестве съёмочной аппаратуры рассматривается оптико-электронная аппаратура (ОЭА), которая обеспечивает получение информации с помощью телескопического комплекса и фоточувствительных элементов.

Объём накопленной информации выразим как произведение информационного потока, который генерируется ОЭА за единицу времени ($I_{\text{ОЭА}}$), на длительность маршрута съёмки ($t_{\text{съёмки}}$):

$$V_{\text{ОЭА}} = I_{\text{ОЭА}} \cdot t_{\text{съёмки}} \cdot$$

Информационный поток ОЭА, зависит от строчной частоты, которая определяется скоростью бега изображения и зависит от высоты орбиты КА.

Определим объем $V_{ОЭА}$ как произведение суммы проекции пикселей вдоль трассы полёта $\sum R_y$ на сумму проекции пикселей поперёк движения спутника $\sum R_x$ [82].

$$V_{ОЭА} = \sum R_x \cdot \sum R_y \cdot b \cdot k_{сж} \cdot t_{съемки},$$

где b – разрядность аналогово-цифрового преобразователя; $k_{сж}$ – коэффициент сжатия информации, который в зависимости от степени обработки информации на борту КА принимает значения от 0,6...1,0.

На рисунке 4.1 продемонстрирован процесс формирования изображения в процессе полёта КА.

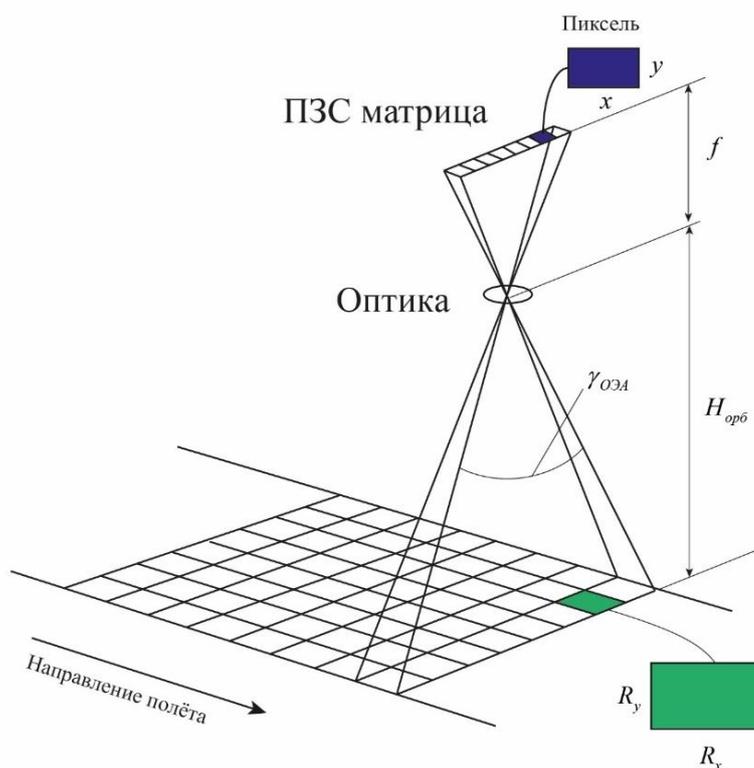


Рисунок 4.1 – Процесс формирования изображения в процессе полёта КА
Сумму проекции пикселей выразим следующим образом:

$$\sum R_x = \frac{L_{ПЗС}}{x},$$

$$\sum R_y = \frac{V_{п.м.} \cdot t_{съемки}}{y},$$

где $V_{n.m.}$ – скорость движения подспутниковой точки, x, y – размеры пикселя фотоприемного устройства.

Скорость движения подспутниковой точки на поверхности Земли определяется следующим образом:

$$V_{n.m.} = \frac{R_3}{R_3 + H_{orb}} V_{КА},$$

где $V_{КА}$ – орбитальная скорость полёта КА по круговой орбите.

Таким образом информационный поток, генерируемый целевой ОЭА:

$$I_{ОЭА} = \frac{V_{ОЭА}}{t_{съемки}} = \frac{L_{ПЗС}}{x} \cdot \frac{V_{n.m.}}{y} \cdot b \cdot k_{сж}.$$

На рисунке 4.2 представлены результаты расчётов информационного потока ОЭА для заданного диапазона высот функционирования малого КА при коэффициенте сжатия $k_{сж} = 1$.

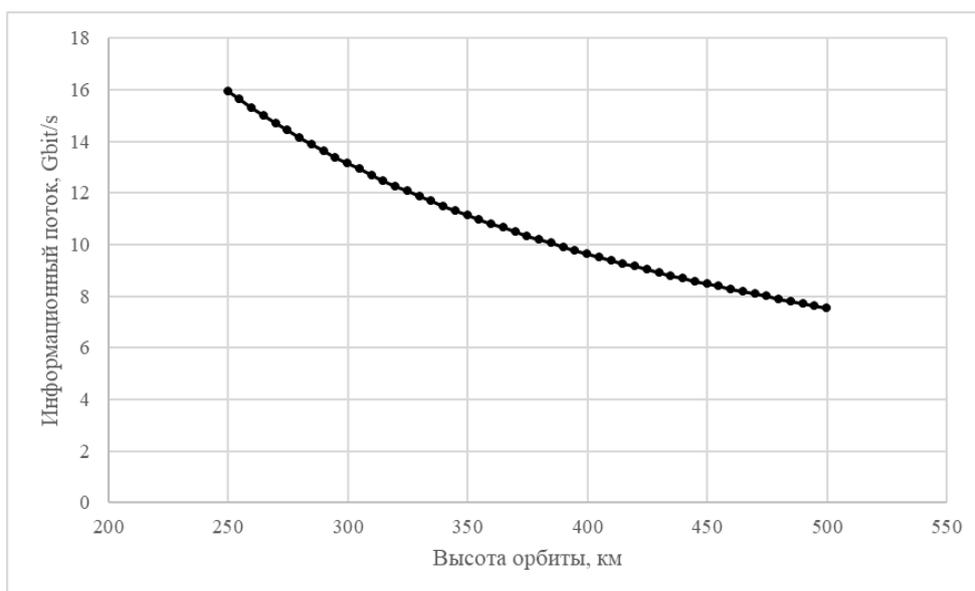


Рисунок 4.2 – Информационный поток ОЭА для заданного диапазона высот

Из графика видно, что в диапазоне высот 250-350 км рассматриваемая ОЭА может генерировать информационный поток от 16 до 11,5 Гбит/с соответственно.

4.3 Выбор орбитальных параметров группировки КА, обеспечивающей квазинепрерывный обзор

Для определения орбитальных параметров группировки КА, обеспечивающей квазинепрерывный обзор необходимо определить орбитальные

параметры одиночного КА, обеспечивающие минимальную периодичность наблюдения и максимальную площадь покрытия земной поверхности [83-85].

С этой целью было проведено имитационное моделирование функционирования одних суток полёта КА для расчёта таких параметров функционирования как процент покрытия поверхности Земли и средней периодичности наблюдения. На рисунках 4.3 а и 4.3 б представлены графики зависимости процента покрытия и график средней периодичности наблюдения от изменения высоты орбиты и наклоения соответственно.

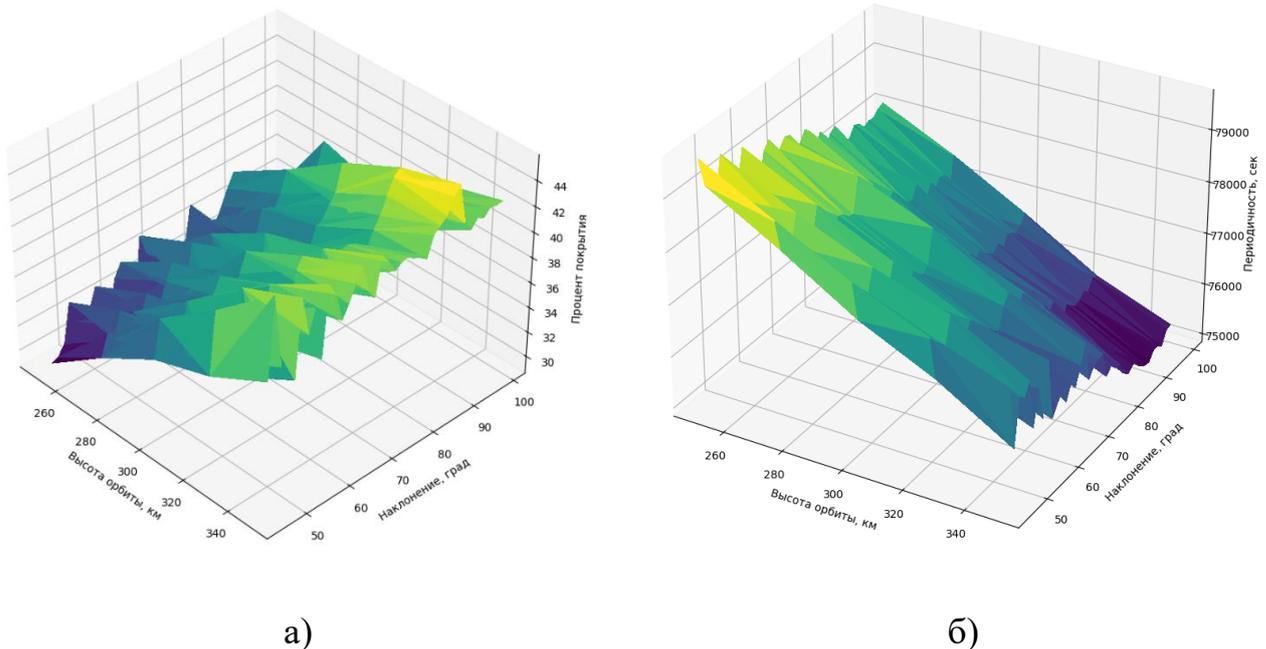


Рисунок 4.3 – Графики зависимости процента покрытия (а) и средней периодичности наблюдения (б) от изменения высоты орбиты и наклоения

Из графиков можно сделать вывод, что процент покрытия увеличивается вместе с ростом высоты орбиты и достигает максимальных значений при наклонении до 85° до 97°. При этом наилучшие значения средней периодичности наблюдения также находятся при наклонениях от 85° до 97° и высотах орбит от 340 до 350 км.

Сузить выбор целевой орбиты для единичного КА можно, получив множество оптимальных по Парето решений. В рассматриваемой задаче критериями оптимальности являются:

- периодичность наблюдения $t_{пер} \rightarrow \min$;

- процент покрытия $cov \rightarrow \max$.

На рисунке 4.4 приведён график зависимости периодичности наблюдения от процента покрытия, красным на рисунке выделены значения оптимальные по Парето.

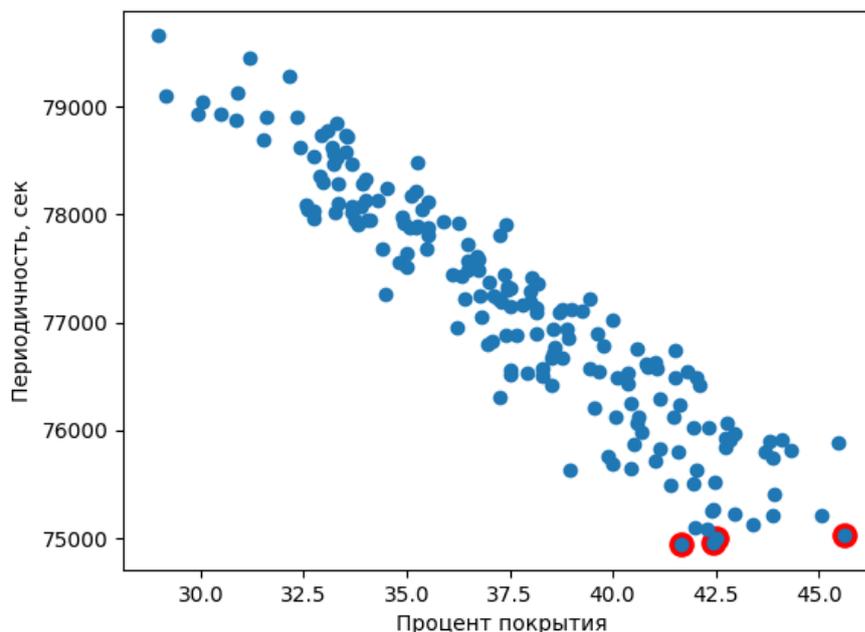


Рисунок 4.4 – График зависимости периодичности наблюдения от процента покрытия

В таблице 4.2 приведены оптимальные по Парето значения высоты орбиты и наклона, обеспечивающие максимальную площадь покрытия поверхности Земли одним КА при минимальной периодичности наблюдения.

Таблица 4.2 – Оптимальные по Парето решения для единичного КА

Номер варианта	Высота орбиты, км	Наклонение, град	Средняя периодичность наблюдения, с	Процент покрытия поверхности Земли, %
1	350	88,5	75027,4147	45,63544784
2	350	90	74958,08065	42,43101474
3	350	91,5	74940,1993	41,64977653
4	350	93	75092,73568	42,2861265
5	350	94,5	75099,30973	41,98343113
6	350	96,85	75007,24866	42,50968582

Одним из типов орбит, которые используются для КА, оснащённых ОЭА, являются солнечно-синхронные орбиты (ССО). К преимуществам ССО относится

способность сохранять постоянную ориентацию своей плоскости по отношению к среднему экваториальному Солнцу. Таким образом, КА пролетает на заданной точке Земли каждый примерно в одно и тоже местное солнечное время. Для дальнейших расчётов в качестве основного примем вариант №6, сочетание высоты орбиты и наклона которого соответствуют условию ССО.

Получив значения высоты и наклона для исходной орбиты единичного КА, приступим к определению орбитальной структуры космической системы обеспечивающей квазинепрерывный обзор поверхности Земли.

Для построения многоспутниковых систем глобального и непрерывного обзора на орбитах с любым наклоном в работах [42-44] Можаяевым Г.В. была предложена методика построения кинематически правильных систем, основанная на теории групп. В работах [45-47] были получены методические рекомендации, основанные на базе эмпирического подхода, по выбору оптимальных многоспутниковых систем, обеспечивающих глобальный и непрерывный обзор Земли, которые получили название дельта-системы Дж. Уолкера.

Критерием оптимальности при выборе орбитальной структуры систем глобального и непрерывного обзора является минимальное количество КА в зависимости от высоты орбиты, при условии покрытия зонами обзора всей поверхности Земли. Дельта-системы строятся на круговых орбитах одинакового радиуса и наклона, имеют одинаковое количество спутников в орбитальных плоскостях, характеризуются равномерным распределением как спутников на одной орбите, так и восходящих узлов орбит. При этом спутники, находящиеся в соседних орбитальных плоскостях, либо одновременно пересекают экватор, либо делают это с определённым сдвигом по времени – с расфазировкой. Дельта-системы принято обозначать следующим образом:

$$i : N, P, F,$$

где, i – наклонение, N – количество спутников в системе; P – количество плоскостей орбит (один из делителей числа N); F – коэффициент расфазировки спутников в соседних плоскостях, $F = 0 \dots (P - 1)$.

Для поиска оптимальных или близких к оптимальным решений орбитального построения многоспутниковых низкоорбитальных систем в настоящей работе предлагается выполнить имитационное моделирование функционирования группировки для одних суток полета. С помощью разработанного программного комплекса была произведена оценка покрытия и средней периодичности наблюдения шестидесяти одной дельта-системы, варьируя от одного до десяти значения количества орбитальных плоскостей системы ($N_{пл}$) и количества КА в каждой плоскости ($N_{КА}$). В качестве исходной орбиты принимается орбита с параметрами:

$$H_{орб} = 350 \text{ км}; i = 96,85^\circ.$$

На рисунках 4.5 а и 4.5 б представлены графики зависимости процента покрытия Земли (а) и средней периодичности наблюдений (б) от изменения количества плоскостей в составе КС и количества КА в каждой плоскости.

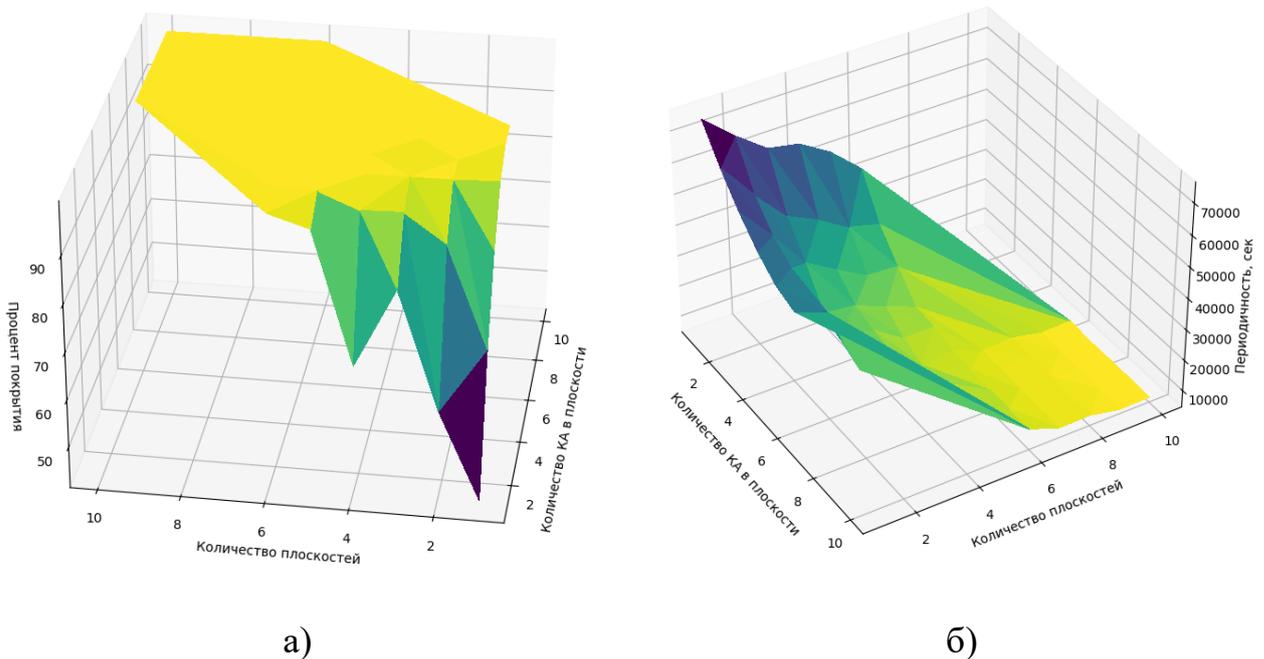


Рисунок 4.5 – Зависимость процента покрытия Земли (а) и средней периодичности наблюдений (б) от изменения количества плоскостей в составе КС и количества КА в каждой плоскости

Принимая во внимание, что для построения многоспутниковой системы, обеспечивающей квазинепрерывный обзор необходимо гарантировать минимальную периодичность наблюдения при минимальном количестве

задействованных КА. При этом следует учитывать, что для сокращения затрат на выведение и поддержание КС следует минимизировать количество плоскостей в системе.

- периодичность наблюдения $t_{nep} \rightarrow \min$;
- количество плоскостей $N_{пл} \rightarrow \min$;
- общее количество КА $N_{КА} \rightarrow \min$.

На рисунке 4.6 показана зависимость средней периодичности наблюдений от суммарного количества КА. Красным на графике выделены оптимальные по Парето решения, учитывающие приведённые выше критерии.

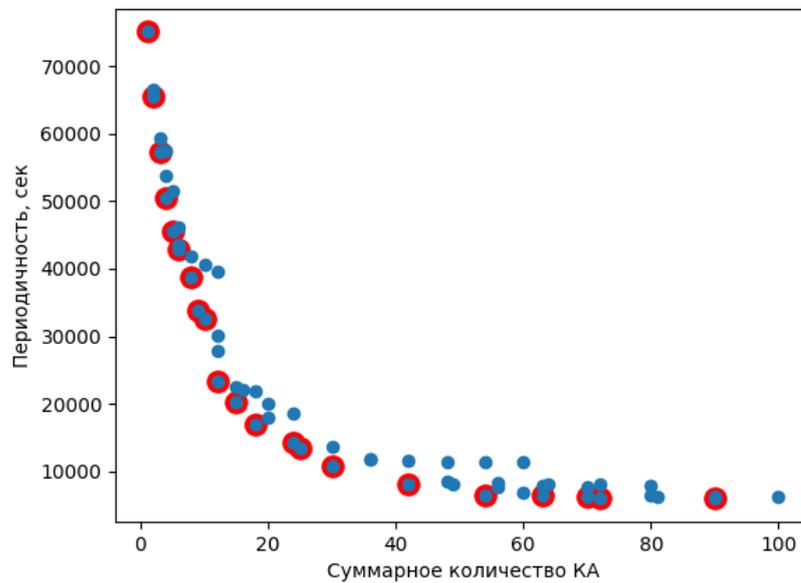


Рисунок 4.6 – Зависимость средней периодичности наблюдений от общего количества КА

Как можно заметить, на рисунке 4.6 оптимальными по Парето могут быть решения практически на всем диапазоне изменения периодичности и суммарного количества КА. Для того чтобы сузить количество вариантов, отбросим варианты с периодичностью наблюдений больше, чем 2,5 часа. В таблице 4.3 приведены оптимальные по Парето решения для многоспутниковой системы. Каждый вариант обеспечивает практически глобальное покрытие поверхности Земли со средней периодичностью наблюдения лучше 2,5 часа.

Таблица 4.3 – Оптимальные по Парето решения для многоспутниковой системы

№ варианта	Общее кол-во КА	Кол-во КА в одной плоскости	Кол-во плоскостей	Средняя периодичность наблюдения, с	Суммарная площадь наблюдения, км ²	Процент покрытия поверхности Земли, %
1	42	6	7	8169,909	5,09E+08	99,85774
2	56	8	7	7739,583	5,09E+08	99,85774
3	54	6	9	6533,095	5,09E+08	99,85774
4	63	7	9	6453,104	5,09E+08	99,85774
5	72	8	9	6056,415	5,09E+08	99,85774
6	90	10	9	5988,998	5,09E+08	99,85774
7	70	7	10	6318,017	5,09E+08	99,85774

4.4 Оценка периодичности наблюдения локальных районов Земли группировкой КА

Поскольку все варианты построения многоспутниковой системы, приведённые в таблице 4.3 обеспечивают одинаковый процент покрытия земной поверхности, в дальнейшем по совокупности критериев будут рассматриваться варианты №1, 3, 5, которые обеспечивают наименьшую периодичность наблюдения при меньшем общем количестве КА в группировке. Проведём моделирование работы этих систем с учётом того, что съёмка ОЭА возможна только на освещённой поверхности Земли, для этого задаётся угол возвышения Солнца.

Принято считать, что для КА ДЗЗ с оптико-электронной аппаратурой минимальный угол возвышения Солнца, при котором возможна съёмка составляет 10°.

Таким образом, в качестве исходных данных для моделирования были заданы:

- объекты наблюдения в виде точек пересечения долготы и широты с шагом 10°;
- угол поля зрения ОЭА $2\alpha = 1,5^\circ$;
- угол отклонения по крену $\gamma = \pm 30^\circ$;
- угол отклонения по тангажу $\vartheta = \pm 10^\circ$.

Для иллюстрации результатов моделирования вариантов №1, 3, 5 были построены тепловые карты распределения периодичности наблюдения заданной сетки объектов наблюдения (рисунки 4.7 – 4.12). В связи с тем, что в зависимости от времени года условия освещённости могут существенно изменяться, тепловые карты были построены для суток полёта осенью и весной.

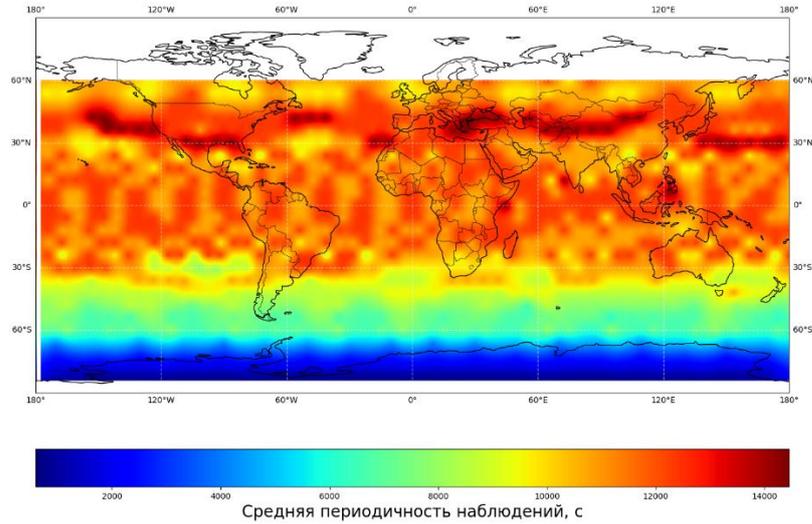


Рисунок 4.7 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта №1 (осень)

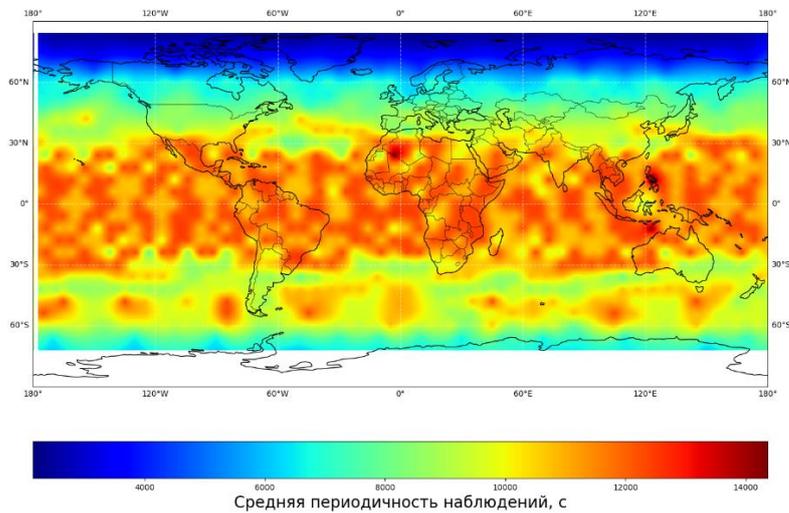


Рисунок 4.8 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта №1 (весна)

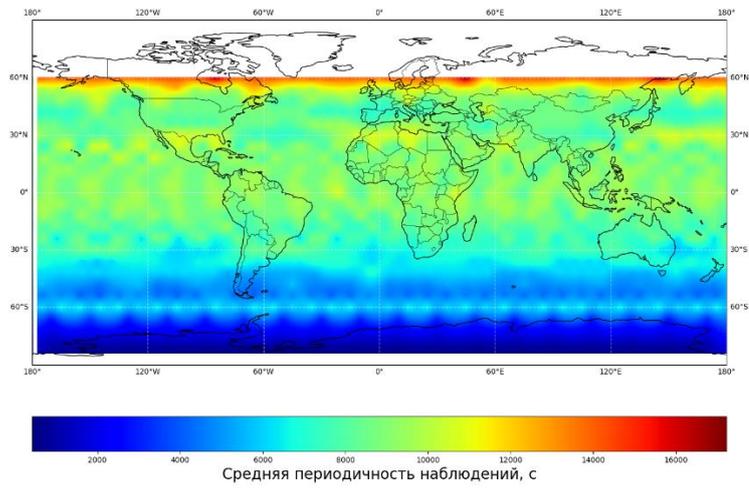


Рисунок 4.9 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта №2 (осень)

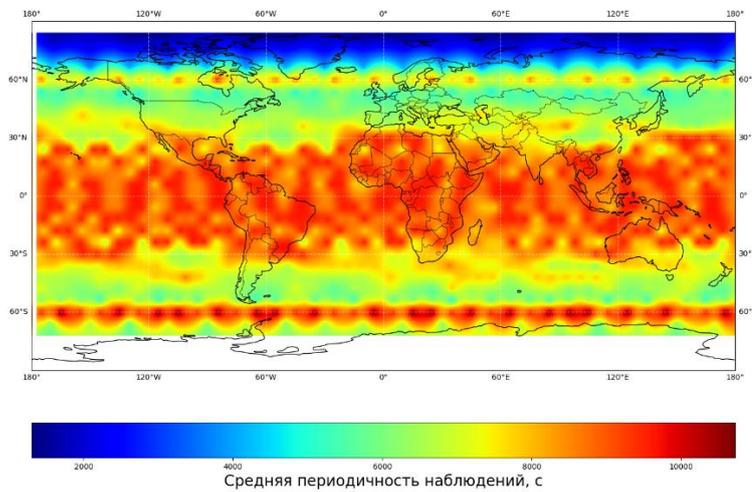


Рисунок 4.10 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта №2 (весна)

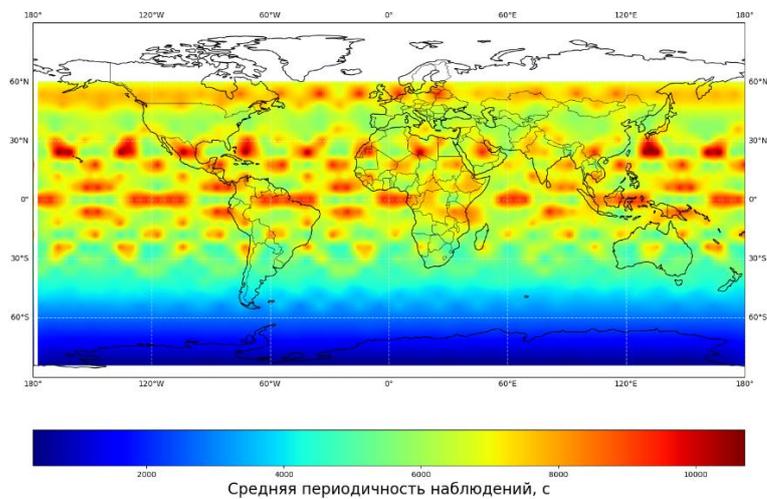


Рисунок 4.11 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта №3 (осень)

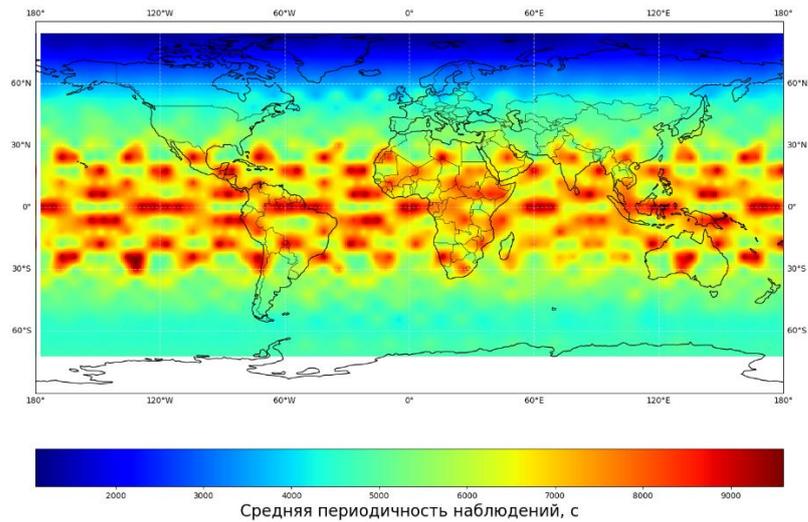


Рисунок 4.12 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений для варианта №3 (весна)

В таблице 4.4 приведены достигнутые показатели покрытия при учёте освещённости поверхности Земли.

Таблица 4.4 – Достигнутые показатели покрытия при учёте освещённости поверхности Земли

	Вариант №1	Вариант №3	Вариант №5
Обозначение в формате $i : N, P, F$	96,85: 42, 7, 0	96,85: 54, 9, 0	96,85: 72, 9, 0
Распределение плоскостей по долготе восходящего узла, °	51,4286	40	40
Распределение КА по углу истинной аномалии, °	60	60	45
Высота орбиты, км	350	350	350
Процент отснятой поверхности за сутки	94,5027	94,5027	94,5027
Время до максимального покрытия	21 час	19 часов 45 минут	19 часов 15 минут

Как видно из таблицы 4.4 все три рассматриваемых системы демонстрируют одинаковые значения значение процента покрытия Земли. Такие результаты вызваны тем, что в моделируемых космических системах не используются космические аппараты, располагающиеся на полярных орбитах. Включение такой

орбиты в орбитальную структуру позволит увеличить процент покрытия, однако возрастёт вероятность столкновений в приполярном регионе.

4.5 Поиск оптимального расположения наземных пунктов приёма информации

Согласно предложенной в разделе 2.1 методике для поиска оптимального расположения наземных пунктов приёма информации необходимо минимизировать количество используемых НППИ, обеспечивая выполнение следующих условий: - каждый КА получает достаточно времени связи с НППИ для передачи заданного объёма данных; - сеансы связи, пересекающиеся во времени, не используют одну и ту же станцию или спутник одновременно.

$$\sum_{\substack{c \in C(g_j) \\ g_j \in G'}} \Delta t(c, s_i) \geq T_{req}(s_i), \quad \forall s_i \in S,$$

где: $\Delta t(g_j, s_i)$ – длительность сеанса связи спутника s_i через станцию g_j , а контакты не пересекаются во времени для каждой станции и спутника, $T_{req}(s_i)$ – требования по времени передачи данных.

Для решения этой задачи воспользуемся разработанным алгоритмом и программным комплексом. Объем накопленной за сутки целевой информации определяется как произведение информационного потока на суммарное время работы ОЭА в сутки:

$$V_{ОЭА(сут)} = I_{ОЭА} \cdot \sum t_{ОЭА}.$$

Предположим, что ОЭА работает на каждом витке, тогда:

$$\sum t_{ОЭА} = n \cdot t_{ОЭА},$$

где n - количество витков в сутки, $t_{ОЭА}$ - время съёмки на витке.

Исходя из рисунка 4.2, рассматриваемая ОЭА, функционируя на высоте 350 км, генерирует информационный поток $I_{ОЭА} = 11,5 \text{ Гбит} / \text{с}$. Предположим, что суммарное время работы ОЭА составляет 400 с в сутки, а скорость передачи информации $I_{СПИИ} = 2,0 \text{ Гбит} / \text{с}$, таким образом при высоте орбиты 350 км, за 16 витков ОЭА будет генерировать:

$$V_{OЭА(сут)} = I_{OЭА} \cdot \sum t_{OЭА} = 4600 \text{ Гбит}.$$

В таблице 4.5 приведены проектные параметры рассматриваемых вариантов, необходимые для дальнейшего поиска оптимального расположения наземных пунктов приёма информации.

Таблица 4.5 – Проектные параметры рассматриваемых вариантов построения космических систем

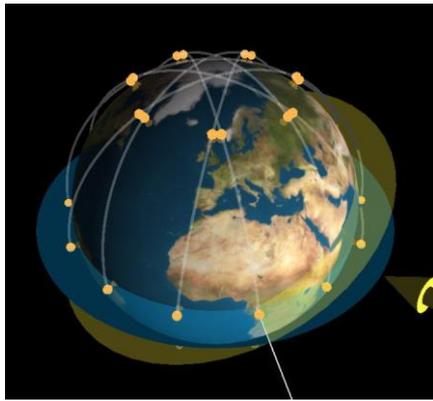
№ варианта	Высота орбиты, км	Наклонение, град	Скорость передачи данных, Гбит/с	Объём информации КА ДЗЗ в сутки, Гб	Общее кол-во КА	Кол-во КА в одной плоскости	Кол-во плоскостей
1	350	96,85	2,0	575	42	6	7
3					54	6	9
5					72	8	9

Необходимо определить минимальное количества наземных станций, обеспечивающих получения требуемого объёма информации. Найти оптимальное географическое расположение этих станций на территории стран БРИКС. А также оценить эффективность каждого варианта с точки зрения полноты выполнения требований.

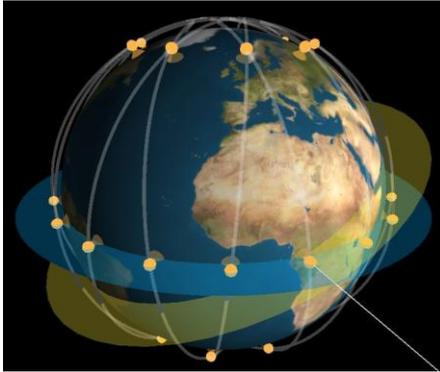
4.5.1 Моделирование орбитального движения

Для моделирования движения КА группировок были получены параметры орбит для каждого КА в группировке. Орбитальные плоскости равномерно распределены по долготе восходящего узла с шагом $360^\circ/P$, где P – количество плоскостей. Космические аппараты в каждой плоскости равномерно распределены по аргументу широты с шагом $360^\circ/N$, где N – количество КА в плоскости.

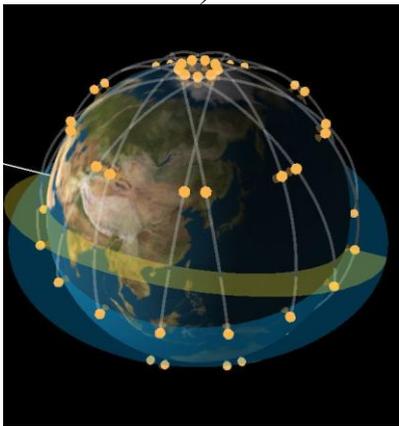
С помощью разработанного программного комплекса было проведено моделирование орбитального движения рассматриваемых вариантов. На рисунке 4.13 представлены трёхмерная визуализация орбитальной структуры (рисунки 4.13 а,в,е) рассматриваемых группировок и трассы полёта спутников (рисунки 4.13 б,г,ж).



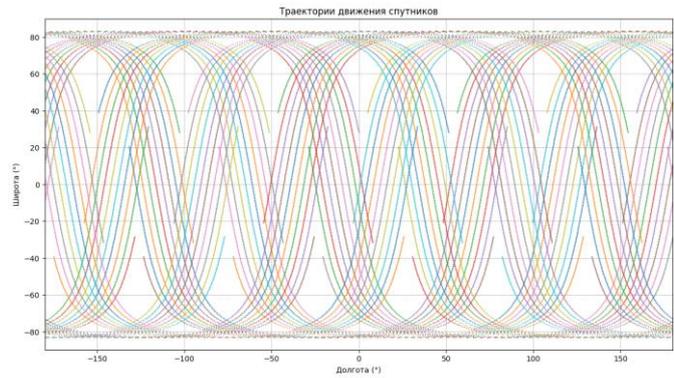
а)



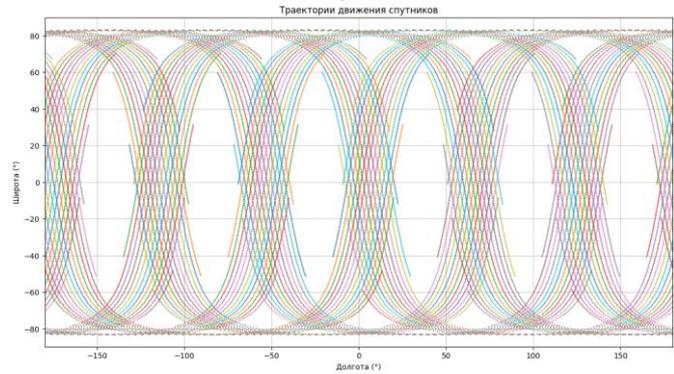
б)



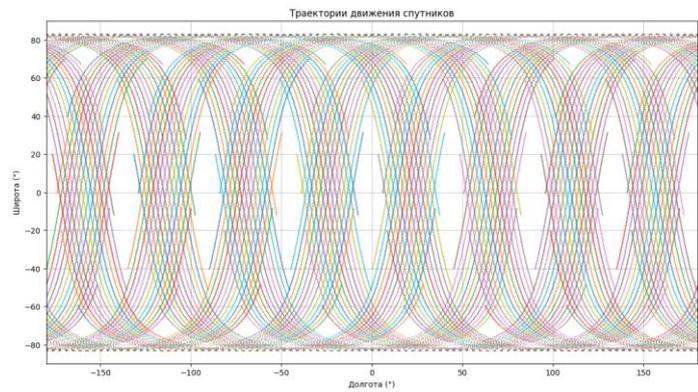
в)



б)



г)



ж)

Рисунок 4.13 – Результаты моделирования орбитального движения рассматриваемых вариантов

Представленные на рисунках 4.13 б,г,ж траектории показали равномерное покрытие земной поверхности для всех трёх вариантов построения космических систем, демонстрируя правильное распределение КА.

4.5.2 Формирование множества станций кандидатов с учётом ограничений

Было сформировано множество потенциальных географических точек размещения наземных станций $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$. В качестве ограничения для расположения массива НППИ-кандидатов были выбраны страны, входящие в БРИКС (рисунок 4.14).



Рисунок 4.14 – Сформированный массив географических координат НППИ-кандидатов

При формировании массива НППИ-кандидатов, представленного на рисунке 4.14, предполагалось, что станции располагаются с шагом 5° по широте и долготе, с учётом ограничений по минимальной и максимальной широте: $lat_{min}^{th} = -65^\circ$, $lat_{max}^{th} = 75^\circ$. Таким образом всего было сгенерировано 211 НППИ.

4.5.3 Анализ результатов моделирования

Согласно предложенному в разделе 2.1 алгоритму для каждой пары "КА-НППИ" определяются временные окна сеансов связи, когда спутник находится в зоне видимости станции с углом места $\theta_{min} \geq 5^\circ$.

Для каждого временного окна сеанса связи длительностью $\Delta t(g_j, s_i)$ рассчитывается объем информации, который может быть передан при заданной скорости передачи данных $R_{data}(s_i)$:

$$D_{daily}(g_j, s_i) = R_{data}(s_i) \cdot \Delta t(g_j, s_i).$$

Затем формируется расписание сеансов связи КА спутниковой группировки путём построения подмножества $C^* \subset C$ сеансов связи таким образом, чтобы сеансы связи, пересекающиеся во времени, не использовали одну и ту же станцию или спутник одновременно, а также максимизировали суммарный объем передаваемой информации:

$$\max_{C^* \subset C} \sum_{c_i \in C^*} D(c_i)$$

На рисунке 4.15 представлен результат работы программного комплекса по поиску оптимального расположения НППИ для многоспутниковой системы ДЗЗ (вариант №1).

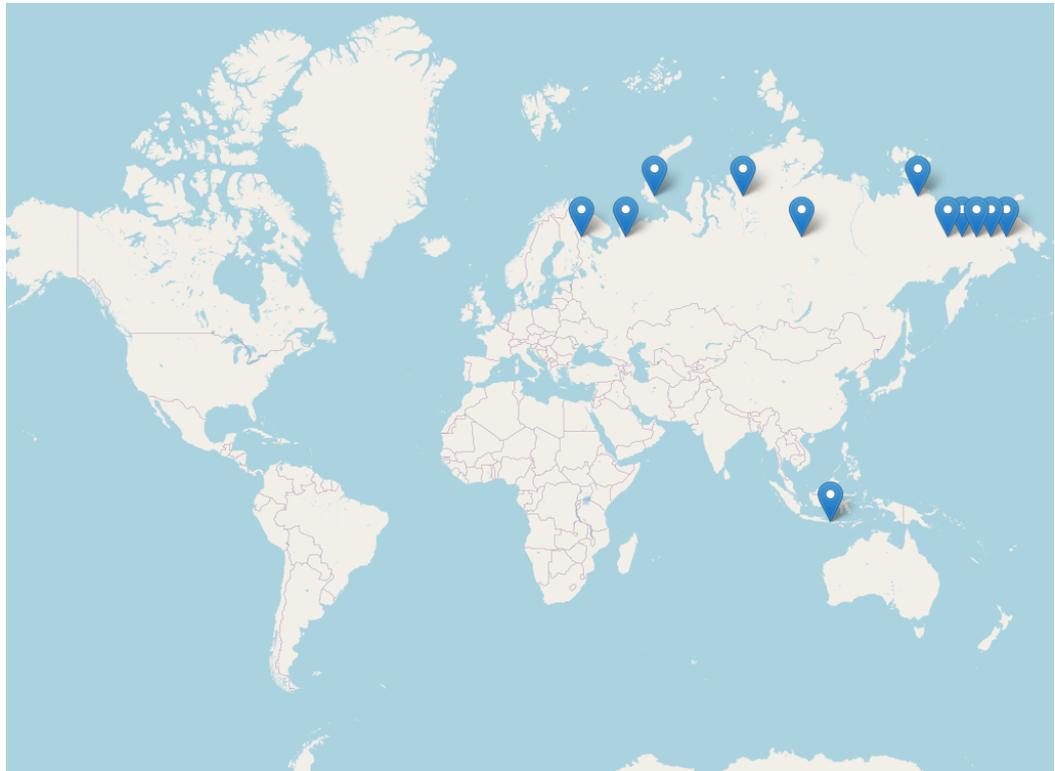


Рисунок 4.15 – Географическое распределение НППИ для спутниковой группировки (вариант №1)

Для обеспечения приёма информации, генерируемой спутниковой группировкой (вариант №1), состоящей из 42 КА ДЗЗ, где каждый КА накапливает 575 Гб информации в сутки, необходимо использование 12 НППИ, из которых 11 НППИ располагается на территории Российской Федерации. В таблице 4.6 представлены результаты анализа загрузки НППИ.

Таблица 4.6 – Загруженность НППИ для варианта №1

Номер станции	Широта, град	Долгота, град	Общее время сеансов связи, час	Общий объем принятых данных, Гб	Количество сеансов связи	Средняя продолжительность сеанса связи, мин
34	66.24939	31.02081	5.95	5355	58	6.155172
47	66.24939	46.02081	1.15	1035	9	7.666667
59	71.24939	56.02081	2.266667	2040	21	6.47619
105	71.24939	86.02081	0.866667	780	7	7.428571
139	66.24939	106.0208	1.066667	960	8	8
150	-8.75061	116.0208	1.85	1665	17	6.529412
196	71.24939	146.0208	0.816667	735	7	7
202	66.24939	156.0208	1.3	1170	10	7.8
205	66.24939	161.0208	1.05	945	8	7.875
207	66.24939	166.0208	1.766667	1590	14	7.571429
209	66.24939	171.0208	3.216667	2895	27	7.148148
210	66.24939	176.0208	6.183333	5565	56	6.625

На рисунке 4.16 показано расписание сеансов связи НППИ с КА спутниковой группировки (вариант №1).

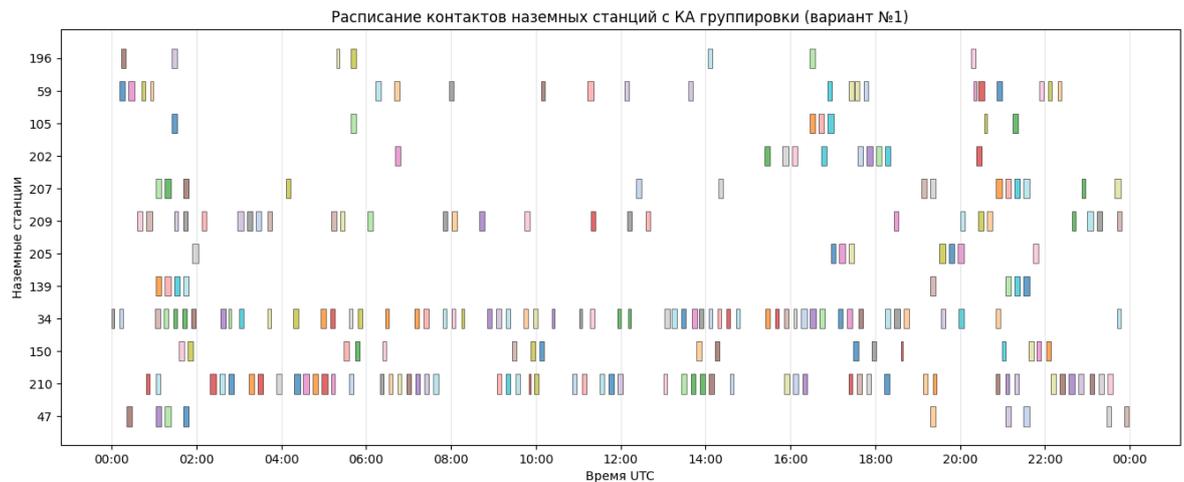


Рисунок 4.16 – Расписание сеансов связи НППИ с КА спутниковой группировки (вариант №1)

Таким образом для передачи требуемых объемов данных необходимо провести 242 сеанса в сутки. Общий объем переданных данных составил 24735,00 Гб, а общее время связи 27,48 часов.

Спутниковая группировка (вариант №3), состоит из 54 КА. Для обеспечения её функционирования требуется создание 21 приёмной станции, из которых 17 НППИ располагаются на территории Российской Федерации. Расположение НППИ

необходимых для приёма заданных объёмов информации представлено на рисунке 4.17.



Рисунок 4.17 – Географическое распределение НППИ для спутниковой группировки (вариант №3)

В таблице 4.7 представлены результаты анализа загруженности НППИ.

Таблица 4.7 – Загруженность НППИ для варианта №3

Номер станции	Широта, град	Долгота, град	Общее время сеансов связи, час	Общий объем принятых данных, Гб	Количество сеансов связи	Средняя продолжительность сеанса связи, мин
31	26.249394	31.020813	2	1800	18	6.66666667
32	31.249394	31.020813	2.05	1845	17	7.23529412
34	66.249394	31.020813	7.15	6435	65	6.6
36	56.249394	36.020813	1.51666667	1365	12	7.58333333
47	66.249394	46.020813	1.63333333	1470	13	7.53846154
59	71.249394	56.020813	3.05	2745	30	6.1
70	21.249394	71.020813	1.25	1125	11	6.81818182
75	71.249394	71.020813	1.43333333	1290	11	7.81818182
83	66.249394	76.020813	1.73333333	1560	13	8
105	71.249394	86.020813	1.43333333	1290	11	7.81818182
124	26.249394	101.020813	0.6	540	5	7.2
131	71.249394	101.020813	1.4	1260	12	7
149	71.249394	111.020813	1.18333333	1065	9	7.88888889
178	71.249394	126.020813	1.08333333	975	9	7.22222222

190	71.249394	136.020813	1.383333333	1245	11	7.54545455
193	71.249394	141.020813	0.516666667	465	4	7.75
198	66.249394	151.020813	1.2	1080	9	8
199	71.249394	151.020813	2.266666667	2040	19	7.15789474
202	66.249394	156.020813	1.45	1305	11	7.90909091
206	61.249394	166.020813	0.483333333	435	4	7.25
208	61.249394	171.020813	0.516666667	465	4	7.75

На рисунке 4.18 показано расписание сеансов связи НППИ с КА спутниковой группировки (вариант №3).

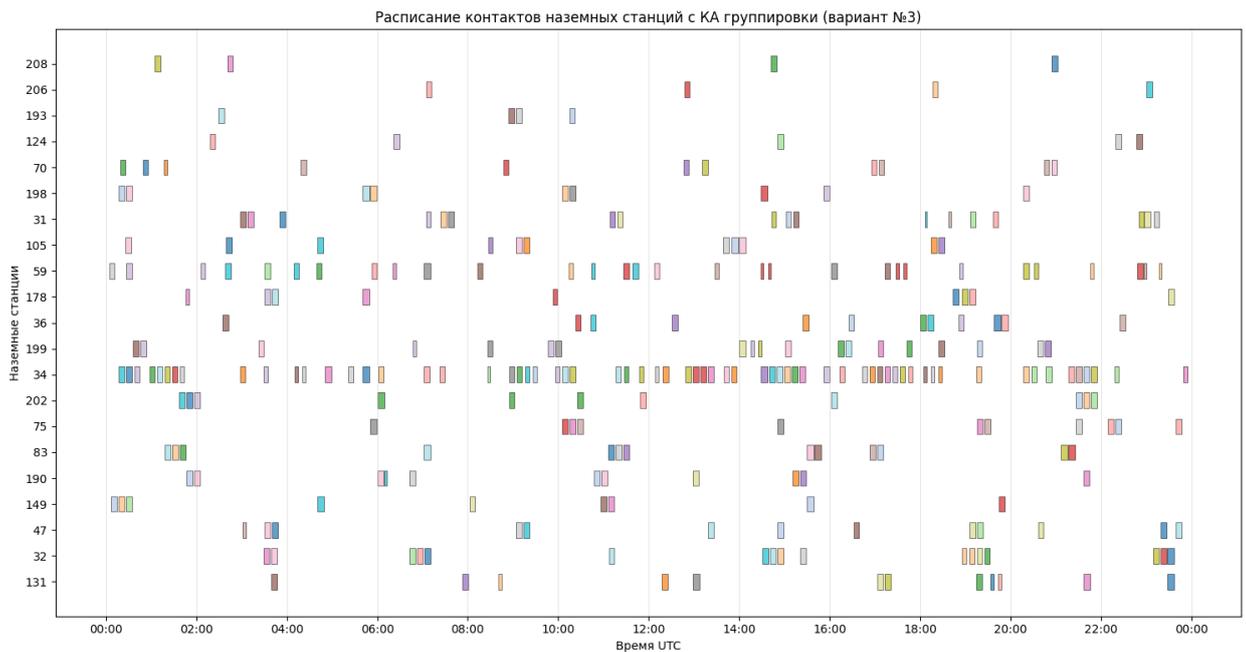


Рисунок 4.18 – Расписание сеансов связи НППИ с КА спутниковой группировки (вариант №3)

Таким образом для передачи требуемых объёмов данных для варианта №3 необходимо провести 298 сеанса в сутки. Общий объем переданных данных составил 31800,00 ГБ, а общее время связи 35,33 часов.

Спутниковая группировка (вариант №5), состоит из 72 КА. Для обеспечения её функционирования требуется создание 24 приёмных станций, из которых 21 НППИ располагается на территории Российской Федерации. Расположение НППИ необходимых для приёма заданных объёмов информации представлено на рисунке 4.19.

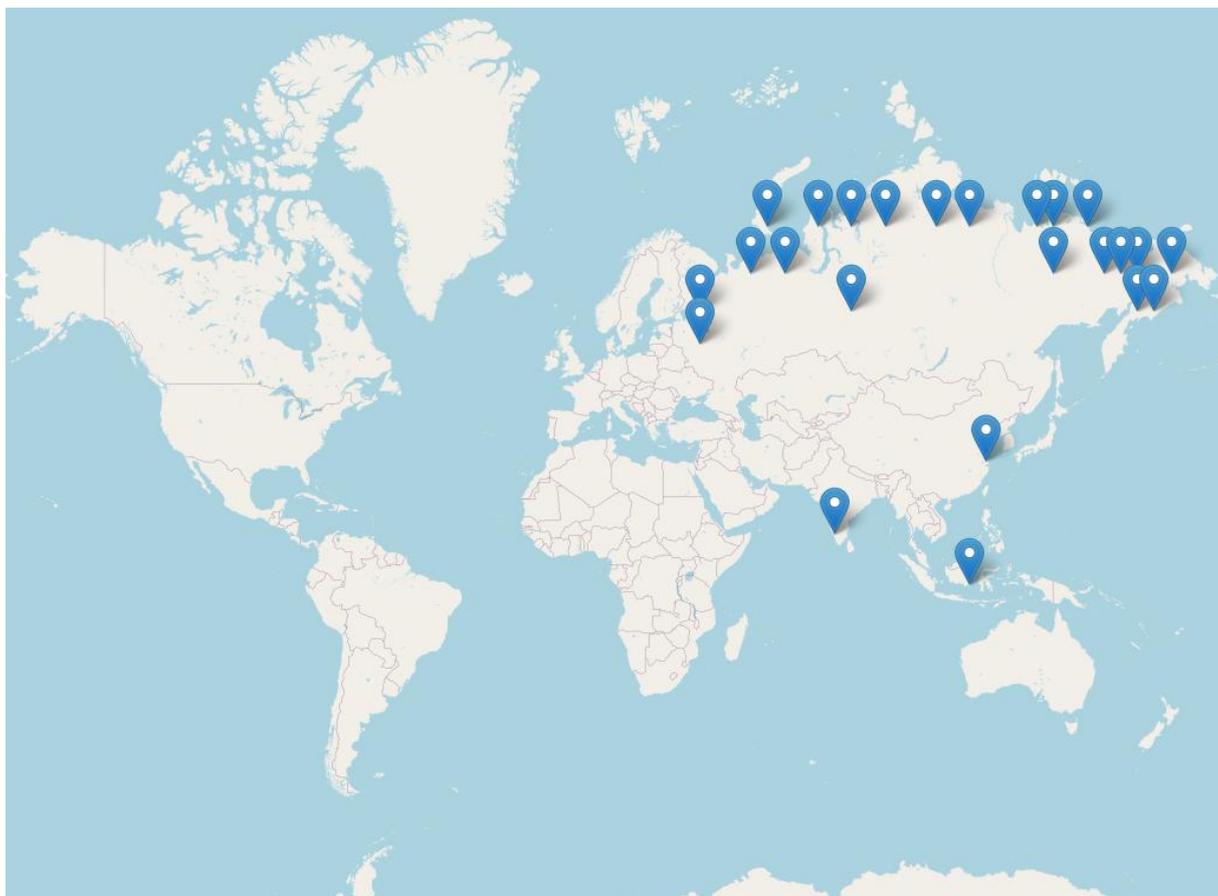


Рисунок 4.19 – Географическое распределение НППИ для спутниковой группировки (вариант №5)

В таблице 4.8 представлены результаты анализа загрузки НППИ.

Таблица 4.8 – Загруженность НППИ для варианта №5

Номер станции	Широта, град	Долгота, град	Общее время сеансов связи, час	Общий объем принятых данных, Гб	Количество сеансов связи	Средняя продолжительность сеанса связи, мин
36	56.24939	36.02081	1.533333	1380	12	7.666667
37	61.24939	36.02081	2.233333	2010	18	7.444444
52	66.24939	51.02081	1.7	1530	13	7.846154
59	71.24939	56.02081	3.416667	3075	31	6.612903
66	66.24939	61.02081	1.45	1305	11	7.909091
75	71.24939	71.02081	2.366667	2130	20	7.1
76	11.24939	76.02081	0.483333	435	4	7.25
92	61.24939	81.02081	1.6	1440	12	8
94	71.24939	81.02081	1.35	1215	11	7.363636
114	71.24939	91.02081	2.033333	1830	16	7.625
140	71.24939	106.0208	1.916667	1725	15	7.666667
151	-3.75061	116.0208	1.483333	1335	13	6.846154
161	71.24939	116.0208	1.916667	1725	15	7.666667
164	31.24939	121.0208	2	1800	18	6.666667
190	71.24939	136.0208	2.433333	2190	19	7.684211

192	66.24939	141.0208	1.6	1440	12	8
193	71.24939	141.0208	1.716667	1545	14	7.357143
199	71.24939	151.0208	0.266667	240	2	8
202	66.24939	156.0208	1.833333	1650	14	7.857143
205	66.24939	161.0208	1.716667	1545	13	7.923077
206	61.24939	166.0208	2.283333	2055	18	7.611111
207	66.24939	166.0208	2.033333	1830	16	7.625
208	61.24939	171.0208	2.6	2340	21	7.428571
210	66.24939	176.0208	5.266667	4740	46	6.869565

На рисунке 4.20 показано расписание сеансов связи НППИ со спутниковой группировкой (вариант №5).

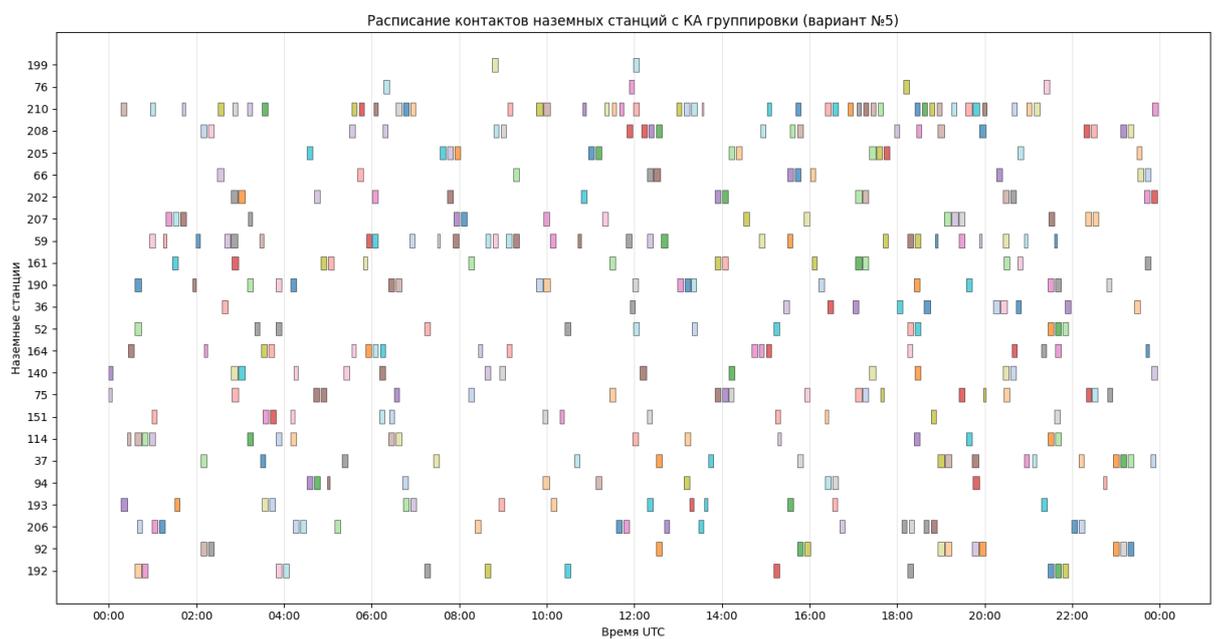


Рисунок 4.20 – Расписание сеансов связи НППИ со спутниковой группировкой (вариант №5)

Таким образом для передачи требуемых объёмов данных для варианта №5 необходимо провести 384 сеанса в сутки. Общий объем переданных данных составил 42510,00 ГБ, а общее время связи 47,23 часов.

В приложении А приведены результаты моделирования информационного обмена между выбранными станциями и спутниками группировки.

На основе полученных данных был проведён анализ распределения нагрузки между НППИ. На рисунках 4.21 – 4.23 приведён суммарный объем информации приходящийся на каждую станцию.

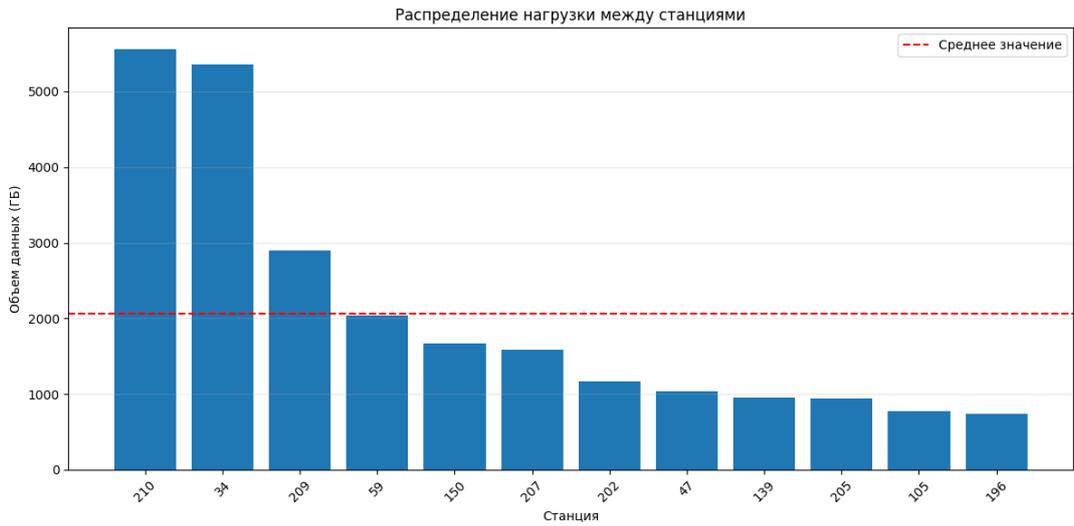


Рисунок 4.21 – Распределение нагрузки между станциями (вариант №1)

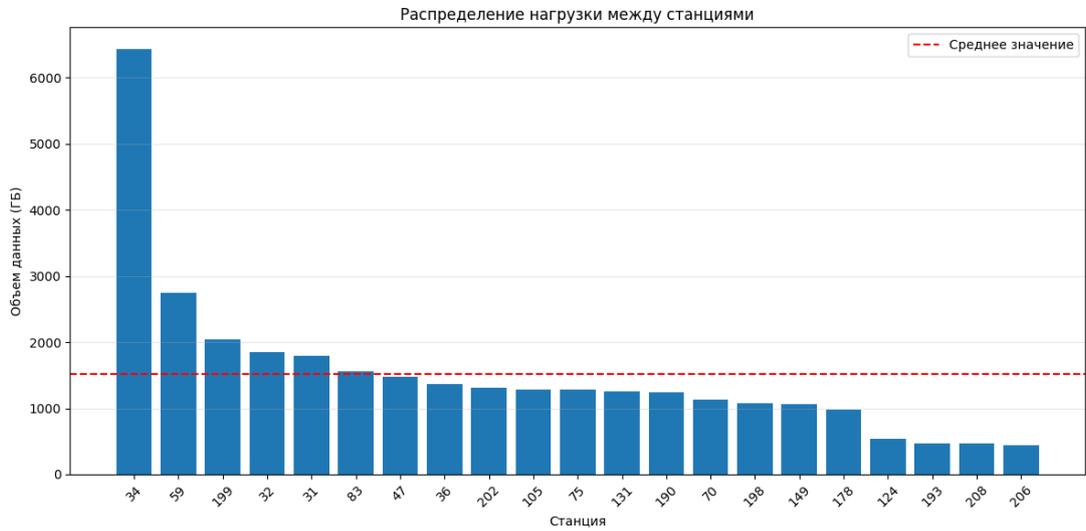


Рисунок 4.22 – Распределение нагрузки между станциями (вариант №3)

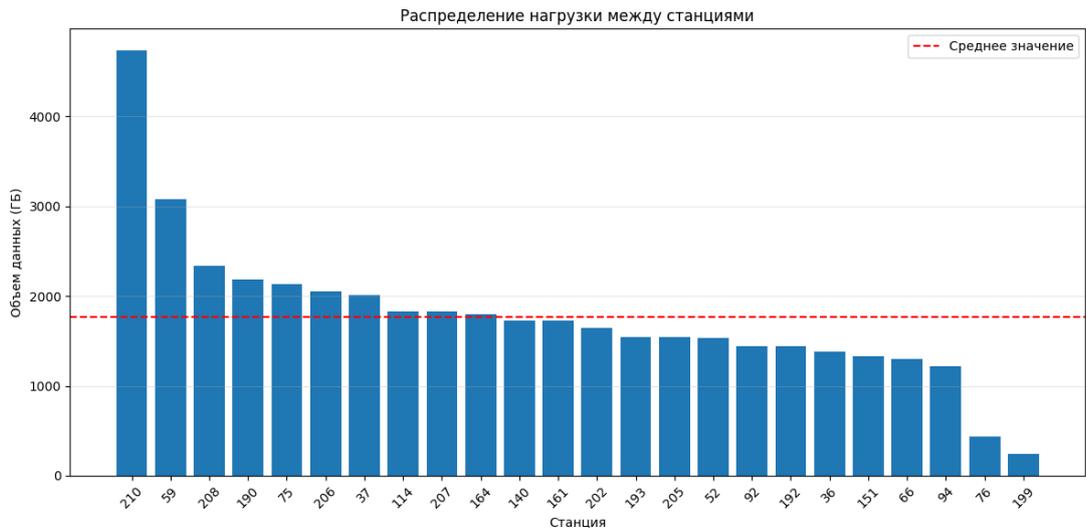


Рисунок 4.23 – Распределение нагрузки между станциями (вариант №5)

Исходя из данных, представленных на рисунках 4.21 – 4.23, можно сделать вывод, что нагрузка на станции распределяется неравномерно во всех вариантах.

Дальнейшая оптимизация распределения нагрузки возможна путём корректировки расположения станций или увеличения их количества, однако это может противоречить критерию минимизации количества станций. Другим способом распределения нагрузки между НППИ может стать использование межспутниковой связи при функционировании космической системы.

Таким образом, для трёх рассматриваемых вариантов построения многоспутниковых систем ДЗЗ были получены данные о расположении НППИ, обеспечивающих оптимальное покрытие трасс спутников и минимизирующих периоды отсутствия связи. Станции распределены таким образом, чтобы максимизировать время видимости спутников и обеспечить возможность передачи всего требуемого объёма информации.

При практической реализации данного решения необходимо учитывать такие дополнительные факторы, как доступность инфраструктуры, включая электроснабжение и необходимые коммуникации, транспортную доступность районов, анализ наличия препятствий, влияющих на маску радиовидимости (горы и высокие здания), а также административные и правовые аспекты размещения НППИ.

4.6 Оценка оперативности доставки информации на наземные пункты приёма от группировки КА

Оперативность $t_{оп}^{КС}$ складывается из нескольких составляющих:

- время необходимое для передачи заявки потребителя на борт КА – $t_{заяв}$;
- в случае использования межспутниковой связи, время необходимое для передачи с борта КА на борт космических аппаратов, находящихся над территорией, заданной в заявке – $t_{заяв_МЛС}$;
- время необходимое для проведения съёмки заданной территории – $t_{ОЭА}$;
- время записи и ожидания информации в БЗУ – $t_{БЗУ}$;

– в случае использования межспутниковой связи, время необходимое для передачи информации ДЗЗ от КА-источника до КА, находящегося в зоне радиовидимости НППИ – $t_{МЛС}$;

– время необходимое для передачи информации с борта КА на НППИ – $t_{пер}$.

Время $t_{заяв}$ зависит от характеристик НППИ, а именно от характеристик приемопередающей аппаратуры. Время $t_{заяв_МЛС}$ и $t_{МЛС}$ зависит от взаимного расположения КА и времени их взаимной видимости, а также от скорости передачи информации – $W_{СПИ}$. Время $t_{БЗУ}$ зависит от ёмкости БЗУ – $V_{БЗУ}$ и информационного потока БЗУ – $I_{БЗУ}$, а также от взаимного расположения КА и НППИ.

В настоящей работе оценка оперативности доставки информации наблюдения на наземные пункты приема от группировки свернизкоорбитальных КА проводится с помощью имитационного моделирования.

В качестве наземной инфраструктуры при моделировании задавались координаты НППИ, полученные в ходе поиска оптимального расположения станций в разделе 4.5.

При моделировании предполагалось, что съёмка ведётся только на освещённой части витка, межспутниковые линии связи отсутствуют, накопленная информация передаётся на первую наземную станцию после съёмки, если выполняются ограничения:

- задержка между съёмкой двух последовательных объектов (5 секунд);
- задержка перед съёмкой после передачи данных (5 секунд);
- задержка перед отправкой данных после съёмки (360 секунд);
- задержка между съёмкой одного и того же объекта разными КА (3600 секунд);
- задержка между передачами данных (5 секунд);
- время подготовки к передаче информации (5 секунд).

Использование подобных ограничений позволяет в процессе имитационного моделирования производить настройку системы, моделировать различные сценарии работы бортовой аппаратуры, что в свою очередь позволяет получить результаты более близкие к реальным.

На рисунках 4.24 – 4.26 приведены тепловые карты, характеризующие среднюю оперативность доставки отснятой информации на НППИ.

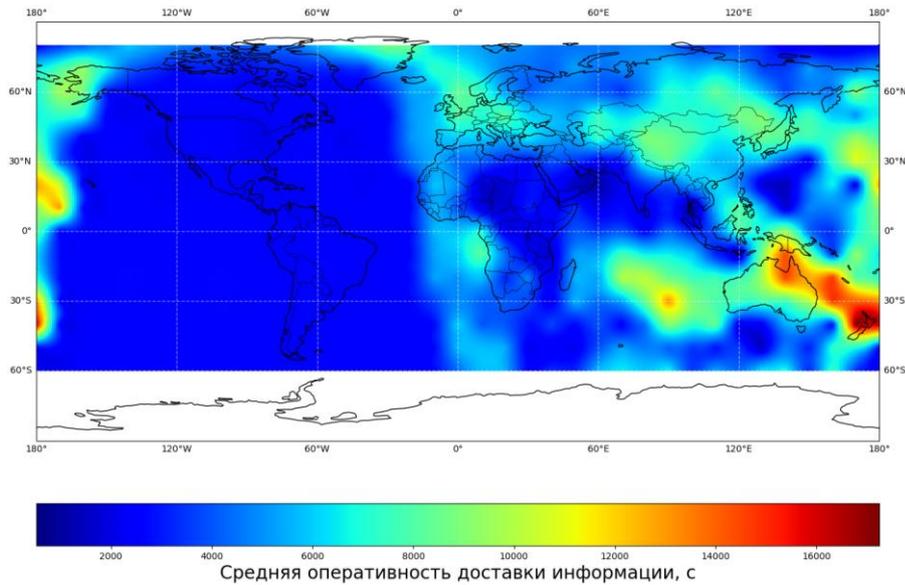


Рисунок 4.24 – Тепловая карта средней оперативности доставки информации на НППИ (вариант №1)

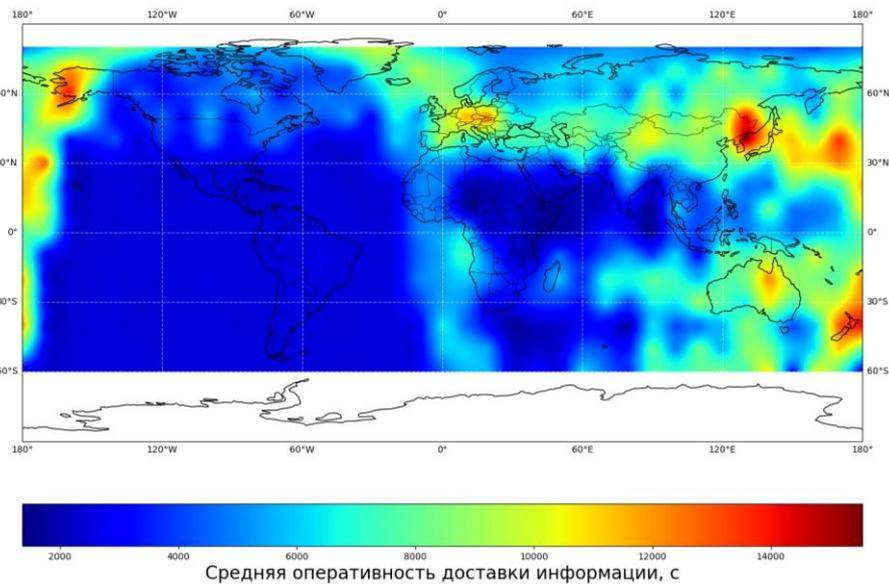


Рисунок 4.25 – Тепловая карта средней оперативности доставки информации на НППИ (вариант №3)

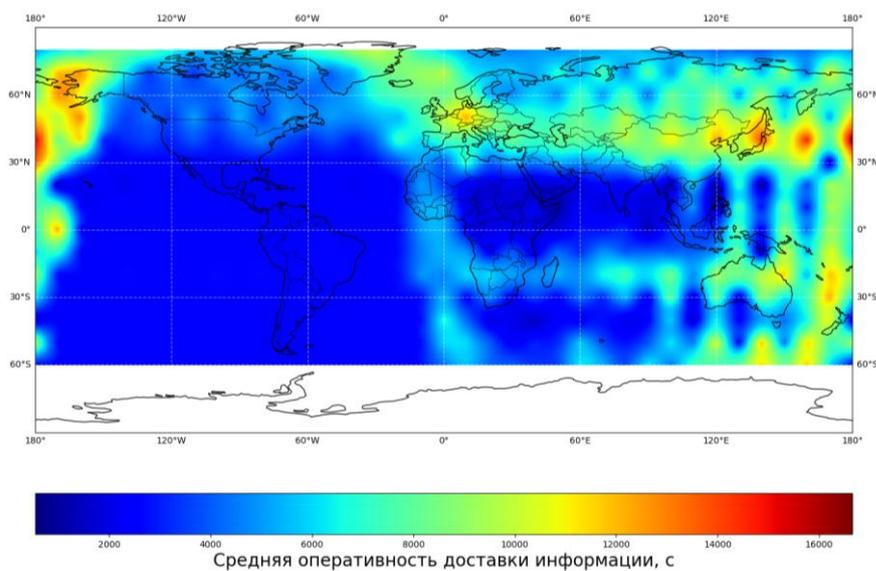


Рисунок 4.26 – Тепловая карта средней оперативности доставки информации на НППИ (вариант №5)

Таким образом, тепловые карты показывают сколько потребуется времени для доставки каждой наблюдаемой точки на НППИ. Оценивая среднюю оперативность доставки информации о локальных участках земной поверхности, можно определить наиболее предпочтительную орбитальную структуру в зависимости от зоны интереса.

Стоит отметить, что представленные в настоящем разделе результаты получены в процессе моделирования одних суток функционирования космических систем, для получения более точных показателей средней периодичности и оперативности следует проводить моделирование большей продолжительности времени функционирования. Однако, достигнутых результатов должно быть достаточно для предварительной оценки показателей функционирования существующих космических систем, а также систем, которые находятся в стадии проектирования.

4.7 Анализ показателей функционирования радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли в решении задач мониторинга Арктического региона и Северного морского пути

Арктический регион приобретает все большее стратегическое значение для Российской Федерации в связи с развитием Северного морского пути, освоением

природных ресурсов и изменением климата. Эффективный мониторинг ледовой обстановки и навигационных условий в Арктике является критически важным для обеспечения безопасности судоходства и экономического развития региона.

Особенности Арктического региона как объекта космического мониторинга включают экстремальные климатические условия, сезонную динамику ледового покрова, ограниченную наземную инфраструктуру и специфику орбитальной баллистики на высоких широтах. Радиолокационные космические системы ДЗЗ обладают ключевыми преимуществами для арктического мониторинга: всепогодностью наблюдений, независимостью от освещенности и способностью различать типы ледового покрова.

Целью данного подраздела является применение разработанной методики оценки показателей функционирования космических комплексов к задаче создания оптимальной радиолокационной космической системы мониторинга Арктического региона, включая анализ существующих решений и разработку рекомендаций по созданию российской системы арктического мониторинга.

4.7.1 Северный морской путь как объект наблюдения космической системы

Согласно Постановлению Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. N 1487 "Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути" [86] существует 28 районов акватории Северного морского пути. Северный морской путь (СМП) – это судоходный маршрут в арктической зоне России, который соединяет европейскую часть страны с Дальним Востоком. Он проходит вдоль северных побережий России, включая акватории Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей. Этот маршрут объединяет европейские и дальневосточные морские порты России, а также устья судоходных рек Сибири в единую транспортную систему. СМП является кратчайшим морским путем между Европой и Азией. Например, расстояние от Санкт-Петербурга до Владивостока по этому маршруту составляет 14 280 километров, в то время как через Суэцкий канал оно увеличивается до 23 200 километров.

На основании описания границ акватории СМП [84], в разработанном программном обеспечении был создан географический полигон и изображена приблизительная трасса СМП (рисунок 4.27).

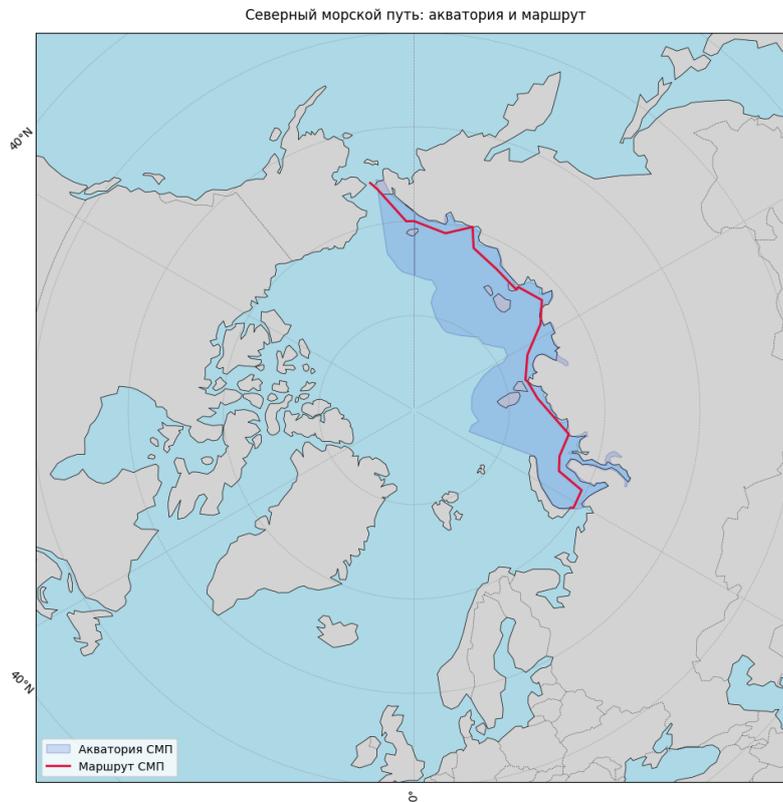


Рисунок 4.27 – Полигон акватории Северного морского пути

Акватория Северного морского пути представляет собой сложный объект для космического мониторинга, характеризующийся значительной протяженностью (около 5600 км от Карских Ворот до Берингова пролива) и шириной до 200-300 км в отдельных районах. Общая площадь акватории составляет приблизительно 1,2 млн км².

Анализ географического полигона СМП показывает неоднородность навигационных условий по трассе маршрута. Наиболее сложными для судоходства и критически важными для мониторинга являются узкие проливы между архипелагами и островами: Вилькицкого (между архипелагом Северная Земля и полуостровом Таймыр), Шокальского и Красной Армии (в районе архипелага Северная Земля), Санникова (между Новосибирскими островами), а также проходы в районе острова Врангеля. Ширина судоходной полосы в этих районах составляет

от 15 до 50 км, что требует высокого пространственного разрешения съемочной аппаратуры для детального мониторинга ледовой обстановки.

Протяженность акватории СМП создает особые требования к периодичности космических наблюдений. При движении со скоростью 10-12 узлов (типичная скорость судов во льдах) время прохождения всего маршрута составляет 10-15 суток, что определяет необходимость обновления информации о ледовой обстановке с периодичностью не более 6-12 часов для обеспечения безопасного планирования движения караванов судов.

Сезонная динамика ледового покрова также влияет на требования к системе мониторинга. В навигационный период (июнь-октябрь) кромка льда постоянно изменяется, создавая новые возможности для судоходства, но одновременно повышая риски из-за подвижек льда и образования сжатий. В зимний период (ноябрь-май) ледовый покров относительно стабилен, однако периодически возникают полыньи и разводья, которые также требуют мониторинга для планирования ледокольных операций.

Таким образом, акватория Северного морского пути как объект космического наблюдения характеризуется большой площадью, сложной геометрией, высокой динамичностью ледовых процессов и необходимостью дифференцированного подхода к мониторингу различных участков трассы в зависимости от их навигационной значимости и сложности ледовых условий.

4.7.2 Требования к космической системе радиолокационного мониторинга акватории Северного морского пути

На основе проведенного анализа существующих космических систем радиолокационного мониторинга и характеристик объекта наблюдения сформулированы требования к космической системе радиолокационных КА для мониторинга акватории Северного морского пути (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Требования к космической системе радиолокационных КА для мониторинга акватории Северного морского пути

№	Категория требований	Параметр	Значение	Обоснование
1	СОСТАВ И ОРБИТАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ГРУППИРОВКИ			
1.1	Состав группировки	Количество КА	не менее 2	Обеспечение требуемой периодичности наблюдений
1.2	Орбитальные параметры	Высота орбиты	550-650 км	Компромисс между разрешением и временем существования
1.3		Наклонение орбиты	70-110°	
1.4		Распределение КА	Равномерное по фазе	Максимизация временного покрытия
2	РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА			
2.1	Диапазон частот	Рабочая частота	X-диапазон (9,0-10,0 ГГц)	Баланс разрешения и проникновения через осадки
2.2	Поляризация	Виды поляризации	HH, HV	Распознавание ледового покрова и судов
2.3	Пространственное разрешение	Детальный режим	не хуже 1,5 м/пикс	Детальный анализ ледовой обстановки
2.4		Обзорный режим	10-15 м/пикс	Оперативный мониторинг больших акваторий
2.5	Полоса обзора	Детальный режим	не менее 15 км	Эффективное покрытие ключевых участков
2.6		Обзорный режим	не менее 100 км	Покрытие протяженной акватории СМП
3	ПЕРИОДИЧНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ			
3.1	Критически важные районы	Навигационный период	не более 8 часов	Проливы, узои, районы интенсивного судоходства
3.2		Зимний период	не более 24 часов	Снижение интенсивности судоходства
3.3	Основные транзитные участки	Навигационный период	не более 24 часов	Основные маршруты движения
3.4		Зимний период	не более 72 часов	Ограниченное судоходство
3.5	Чрезвычайные ситуации	Внеплановые наблюдения	не более 4 часов	ЧС, неблагоприятная ледовая обстановка
3.6	Сопровождение караванов	Непрерывное наблюдение	не более 2 часов	Движение групп судов
4	ОПЕРАТИВНОСТЬ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ			
4.1	Критическая оперативность	ПСР, ЧС	не более 2 часов	Поисково-спасательные операции
4.2	Высокая оперативность	Оперативное планирование	не более 4 часов	Планирование движения судоходства
4.3	Стандартная оперативность	Плановый мониторинг	не более 12 часов	Регулярный мониторинг
5	НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС			
5.1	Пункты приема	Основной пункт	1	Централизованное управление
5.2		Дополнительные пункты	не менее 2	Обеспечение оперативности приема
6	ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КА			
6.1	Масса и габариты	Стартовая масса КА	не более 2500 кг	Возможность группового запуска
6.2		Совместимость	C РН среднего класса	Использование российских носителей
6.3	Система связи	Скорость передачи	не менее 300 Мбит/с	Оперативная передача данных

Представленный комплекс требований обеспечивает создание эффективной космической системы радиолокационного мониторинга акватории Северного морского пути, способной решать задачи:

1. Оперативный мониторинг ледовой обстановки с периодичностью, достаточной для принятия навигационных решений.
2. Контроль движения судов в акватории СМП в режиме близком к реальному времени.
3. Поддержка поисково-спасательных операций с высокой оперативностью доставки информации.
4. Долгосрочный мониторинг климатических изменений в арктическом регионе.

4.7.3 Предложения по созданию радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли для решения задач мониторинга Северного морского пути

4.7.3.1 Выбор орбитальных параметров группировки радиолокационных КА для решения задач мониторинга Северного морского пути

Было проведено имитационное моделирование одних суток полёта КА, оснащенного радиолокационной съемочной аппаратурой с полосой обзора 20 и 100 км (что соответствует детальному и обзорному режиму работы) и функционирующего на высоте 600 км для расчёта таких показателей функционирования как процент покрытия поверхности Земли и средней периодичности наблюдения. В качестве варьируемых параметров рассматривались эксцентриситет и наклонение орбиты. На рисунке 4.28 представлена зависимость периодичности (рисунок 4.28 а) и процента покрытия акватории СМП (рисунок 4.28 б) от изменения наклонения и эксцентриситета орбиты

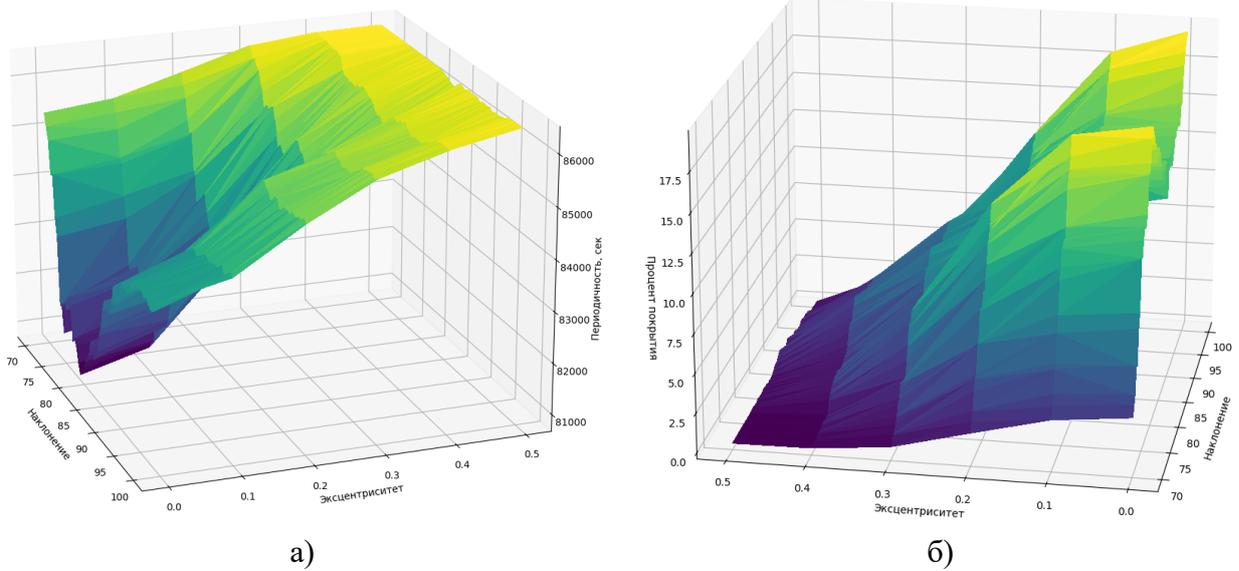


Рисунок 4.28 – Зависимость периодичности (а) и процента покрытия (б) от изменения наклона и эксцентриситета орбиты

Из графиков можно сделать вывод, что процент покрытия увеличивается вместе с уменьшением эксцентриситета и достигает максимальных значений при эксцентриситете равном нулю. При этом наилучшие значения средней периодичности наблюдения также находятся при эксцентриситете равном нулю. Для выбора наилучшего наклона, были определены зависимости периодичности (рисунок 4.29 а) и процента покрытия (рисунок 4.29 б) от изменения наклона при эксцентриситете равном нулю.

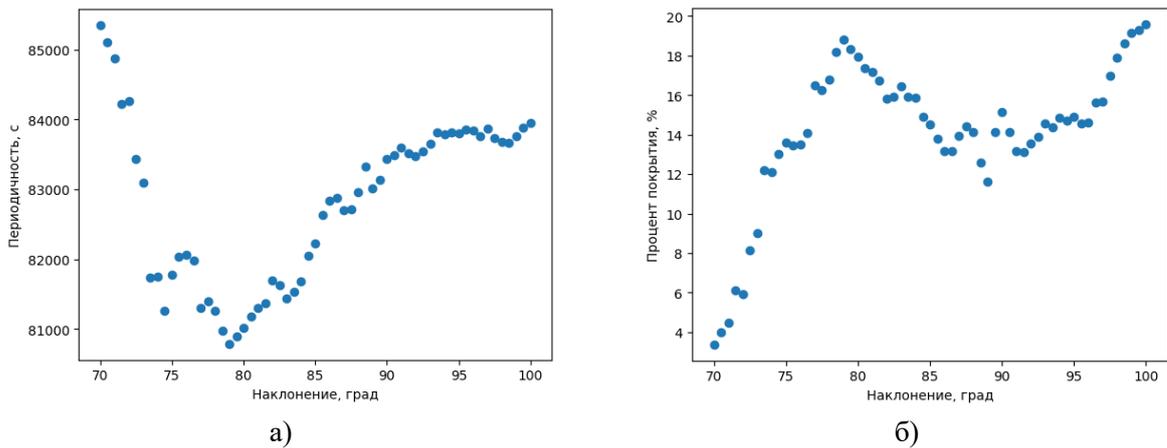


Рисунок 4.29 – Зависимость периодичности (а) и процента покрытия (б) от изменения наклона при эксцентриситете равном нулю

Были найдены Парето-оптимальные решения (рисунок 4.30) при периодичности наблюдения $t_{пер} \rightarrow \min$; проценте покрытия $cov \rightarrow \max$.

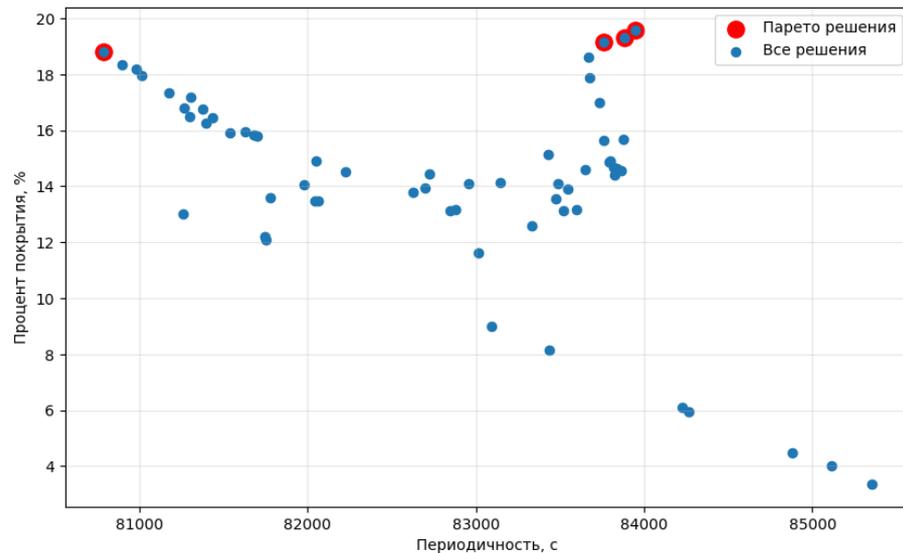


Рисунок 4.30 – Парето-оптимальные решения при периодичности наблюдения $t_{пер} \rightarrow \min$ и проценте покрытия $cov \rightarrow \max$

В таблице 4.10 приведены результаты моделирования для Парето-оптимальных решений орбиты единичного КА.

Таблица 4.10 – Результаты моделирования для Парето-оптимальных решений орбиты единичного КА ($H_{orb} = 600$ км)

Наклонение	Эксцентриситет	Средняя периодичность наблюдений, с	Процент покрытия акватории СМП, %
79.0	0.0	80788.252253	18.798887
97.8	0.0	83764.580709	17.108216
99.0	0.0	83757.687570	19.150064
99.5	0.0	83885.988557	19.318924
100.0	0.0	83948.723347	19.588297

На основе полученных орбитальных параметров единичного КА с помощью разработанного программного комплекса была произведена оценка покрытия и средней периодичности наблюдения акватории СМП. В качестве варьируемых параметров использовались: количество орбитальных плоскостей системы ($N_{nl} = 1 \dots 10$) и количество КА в каждой плоскости ($N_{КА} = 0 \dots 10$). В качестве исходных орбит принимались орбиты с параметрами: эксцентриситет ($e = 0$), высота орбиты ($H_{orb} = 600$ км), наклонение ($i = 79,0^\circ; 97,8^\circ; 99,0^\circ; 99,5^\circ; 100,0^\circ$). В приложении Б приведены результаты моделирования 500 вариантов построения группировок.

На рисунке 4.31 представлена зависимость средней периодичности наблюдений от суммарного количества КА. Красным на графике выделены оптимальные по Парето решения, обеспечивающие периодичность наблюдения $t_{пер} \rightarrow \min$; общее количество КА $N_{КА} \rightarrow \min$.

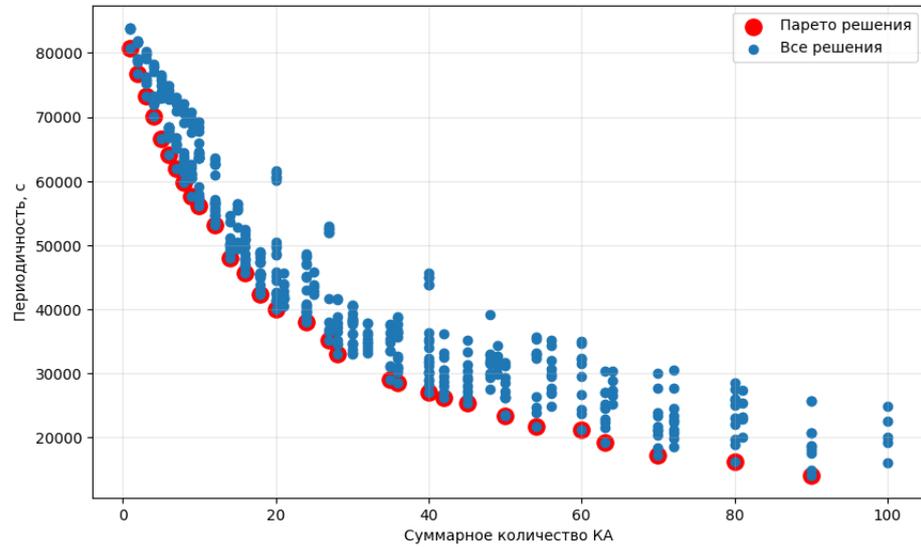


Рисунок 4.31 – Зависимость средней периодичности наблюдений от общего количества КА

На рисунке 4.32 представлена зависимость средней периодичности наблюдений от суммарного количества КА. Красным на графике выделены оптимальные по Парето решения, обеспечивающие процент покрытия $cov \rightarrow \max$; общее количество КА $N_{КА} \rightarrow \min$.

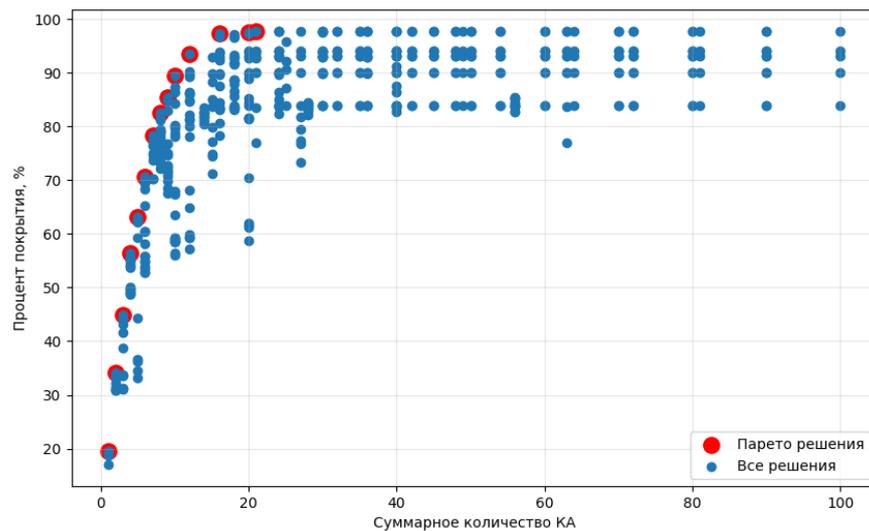


Рисунок 4.32 – Зависимость процента покрытия акватории СМП от общего количества КА

Таким образом было получено два множества оптимальных по Парето решений, удовлетворяющих заданным критериям. В таблице 4.11 представлены результаты моделирования вариантов, которые входят в оба множества Парето оптимальных решений.

Таблица 4.11 – Результаты моделирования для Парето-оптимальных решений космических систем

Обозначение в формате $i: N, P, F$	Общее кол-во КА	Кол-во КА в одной плоскости	Кол-во плоскостей	Средняя периодичность наблюдения, с	Суммарная площадь наблюдения, км ²	Процент покрытия акватории СМП, %
97.8: 12,6,0	12	6	2	53086.244217	2.948513e+06	93.379937
97.8: 16,2,0	16	8	2	45650.428718	3.074660e+06	97.375023
97.8: 20,2,0	20	10	2	39999.162008	3.080360e+06	97.555539

Как видно из таблицы наименьшую среднюю периодичность наблюдения при наибольшем проценте покрытия акватории СМП, показывает орбитальная группировка (97.8: 20,2,0), состоящая из 20 КА, распределённых в двух плоскостях по 10 КА в каждой. На рисунке 4.33 показана тепловая карта распределения периодичности наблюдения, которая обеспечивается данной группировкой в детальном и обзорном режимах съемки.

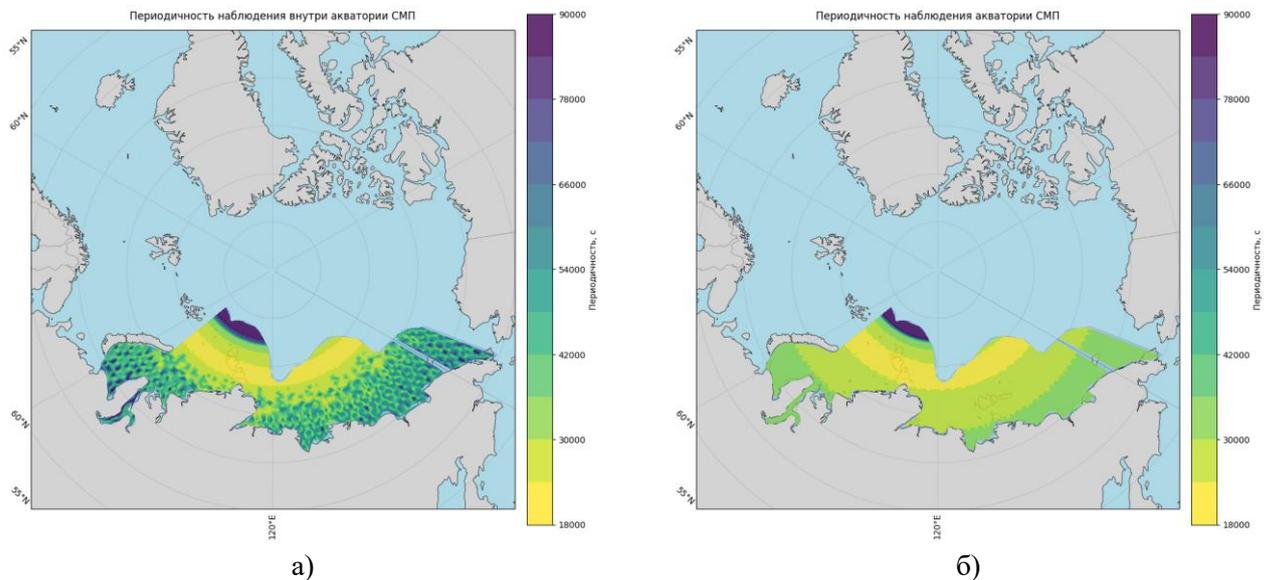


Рисунок 4.33 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений акватории СМП в детальном (а) и обзорном (б) режиме (орбитальное построение $i: N, P, F: 97.8: 20,2,0$)

Наилучшее значение средней периодичности наблюдений рассматриваемого варианта составляет не более 11,1 часов в детальном режиме, наилучшая периодичность наблюдения отдельных регионов – не более 5 часов, что не удовлетворяет требованиям по периодичности наблюдений в детальном режиме критически важных районов в навигационный период. Однако в обзорном режиме средняя периодичность наблюдений акватории СМП не хуже 10 часов, при этом большая часть территории, по которой проходит судоходный маршрут наблюдается с периодичностью не хуже 8,3 часа, что соответствует предъявляемым требованиям. Также стоит отметить, что для обоих режимов съемки остается не покрытым участок акватории СМП, находящийся выше 83° северной широты.

При использовании комбинации критериев: периодичность наблюдения $t_{пер} \rightarrow \min$; процент покрытия $cov \rightarrow \max$, а также при добавлении к рассматриваемому множеству наклонений орбит с наклонением 90° , были найдены решения, обеспечивающие минимальные значения периодичности наблюдения акватории СМП (рисунок 4.34).

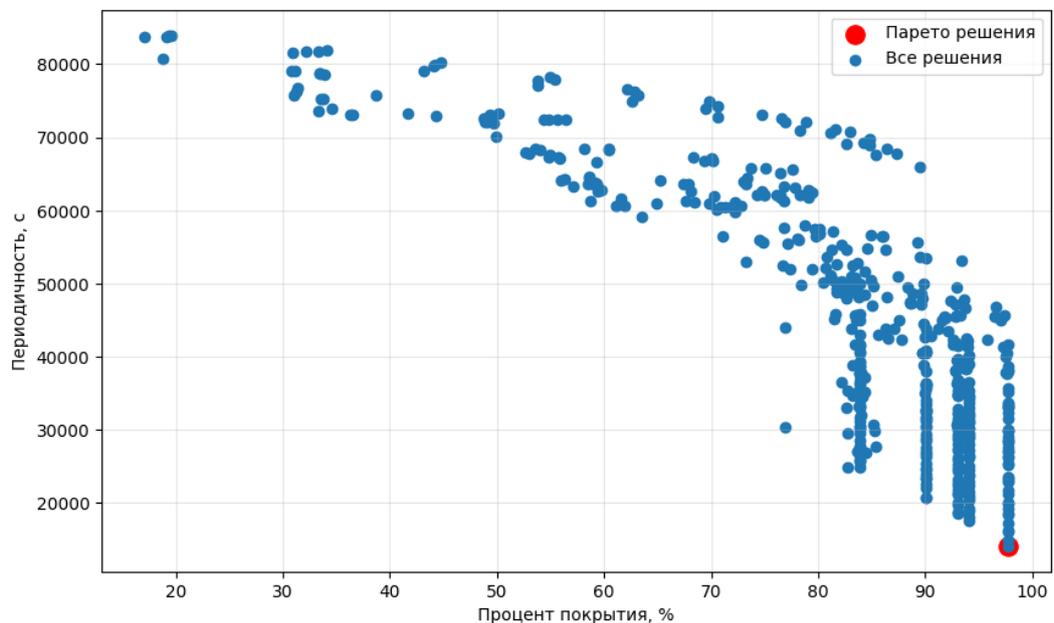


Рисунок 4.34 – Парето-оптимальные решения, обеспечивающие минимальные значения периодичности наблюдения акватории СМП

В таблице 4.12 представлены оптимальные по Парето решения для группировок КА, работающих в детальном режиме съемки.

Таблица 4.12 – Оптимальные по Парето решения для группировок КА, работающих в детальном режиме съемки

Обозначение в формате $i: N, P, F$	Общее кол-во КА	Кол-во КА в одной плоскости	Кол-во плоскостей	Средняя периодичность наблюдения, с	Суммарная площадь наблюдения, км ²	Процент покрытия акватории СМП, %
97.8: 90,9,0	90	10	9	14132.271922	3.085886e+06	97.730562
90: 90,9,0	90	10	9	12618.835501	3.157545e+06	99.999999

Таким образом, согласно данным из таблицы 4.12, наилучшие показатели средней оперативности наблюдений и процента покрытия акватории СМП показывает группировка 90: 90,9,0. По данным детального моделирования функционирования были построены тепловые карты распределения периодичности наблюдения для группировок 97.8: 90,9,0 и 90: 90,9,0 в детальном (рисунок 4.35 а, в) и обзорном режимах съемки (рисунок 4.35 б, г).

Наилучшее значение средней периодичности наблюдений группировкой $i: N, P, F: 97.8: 90,9,0$ составляет не более 1,1 часа в детальном режиме и обзорном режиме съемки. При этом в детальном режиме съемки большая часть акватории СМП наблюдается с периодичностью от 4 до 5 часов. При работе съемочной аппаратуры в обзорном режиме периодичность наблюдений составит от 1,1 до 3,5 часов. Для обоих режимов съемки остается не покрытым участок акватории СМП, находящийся выше 83° северной широты.

В свою очередь группировка $i: N, P, F: 90: 90,9,0$ обеспечивает 99,9% покрытия акватории СМП в обоих режимах съемки. Средняя периодичность наблюдений большей части акватории СМП составляет от 1,1 до 5 часов для детального режима съемки, и от 0,97 до 1,39 часа для обзорного.

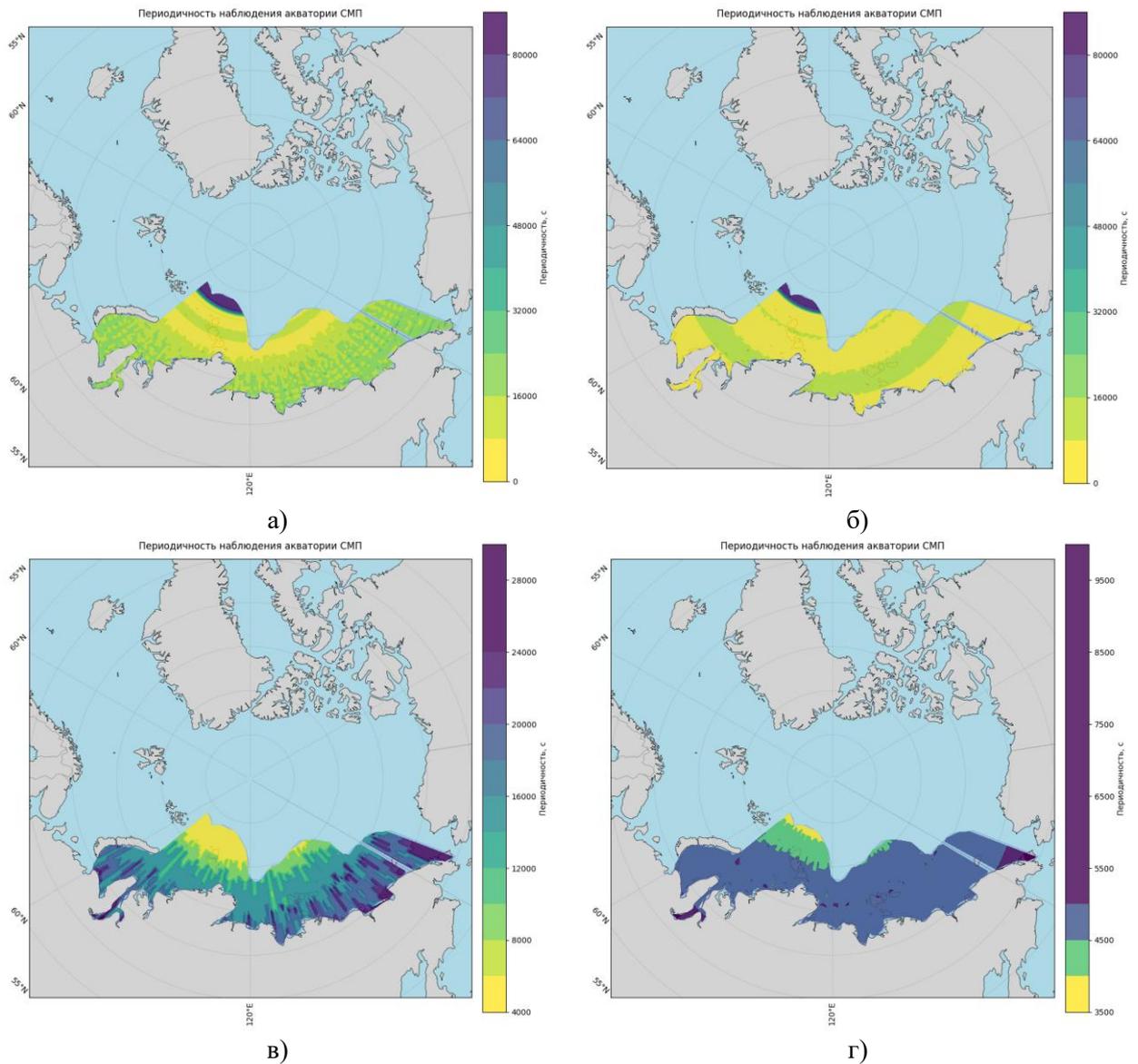


Рисунок 4.35 – Тепловая карта средней периодичности наблюдений акватории СМП группировкой $i: N, P, F : 97.8: 90,9,0$ в детальном (а) и обзорном (б) режиме и группировкой $i: N, P, F : 90: 90,9,0$ в детальном (в) и обзорном (г) режиме

Использование орбит с наклоном 90° связано с техническими сложностями создания и поддержания таких орбит, поскольку требуются постоянная коррекция для поддержания заданной ориентации в пространстве. Орбиты с наклоном 90° практически невозможно реализовать для длительного функционирования группировки, поэтому для дальнейших расчетов рекомендуется принять построение группировки $97.8: 90,9,0$ (рисунок 4.36).

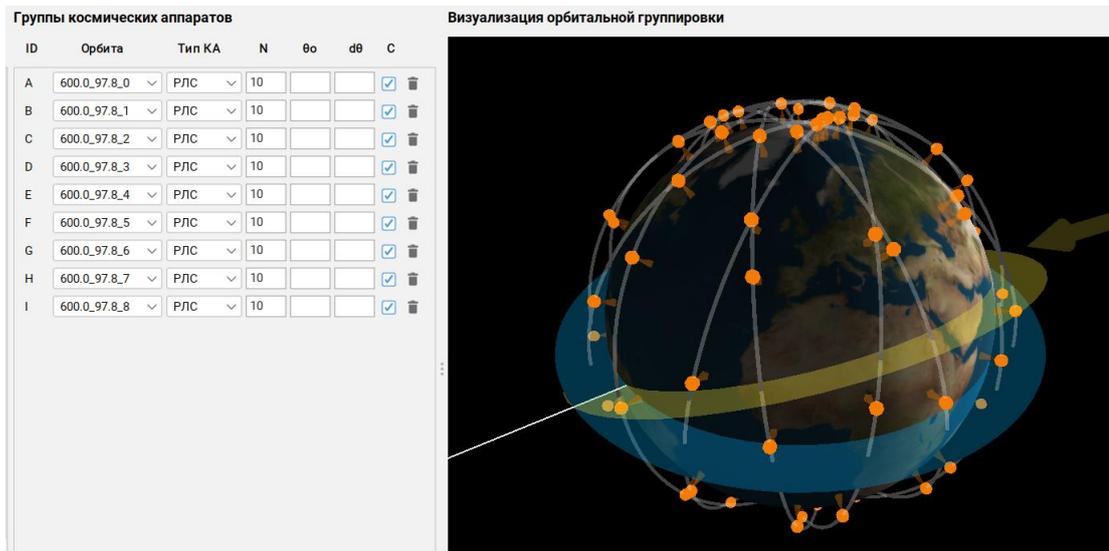


Рисунок 4.36 – Орбитальное построение группировки 97.8: 90,9,0 в разработанном ПО

4.7.3.2 Определение необходимого расположения НППИ и оценка оперативности доставки информации

Согласно методике расчета оперативности, представленной в главе 2, оперативность доставки информации определяется как время, прошедшее от момента съёмки до момента получения данных на наземной станции. Для оценки оперативности доставки информации с использованием имитационного моделирования было проведено моделирование полного цикла получения, хранения и передачи данных на НППИ.

В качестве НППИ-кандидатов рассматривается 10 станций приема ЕТРИС ДЗЗ России $G_{\text{ЕТРИС}} = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ (рисунок 4.37).



Рисунок 4.37 – Существующие станции приёма ЕТРИС ДЗЗ России

В результате проведенного имитационного моделирования (рисунок 4.38) и работы программного комплекса по поиску оптимального расположения НППИ был найден минимум станций, необходимый и достаточный для приема информации об акватории СМП (таблица 4.13), создаваемого рассмотренной выше группировкой с орбитальным построением 97.8: 90,9,0.

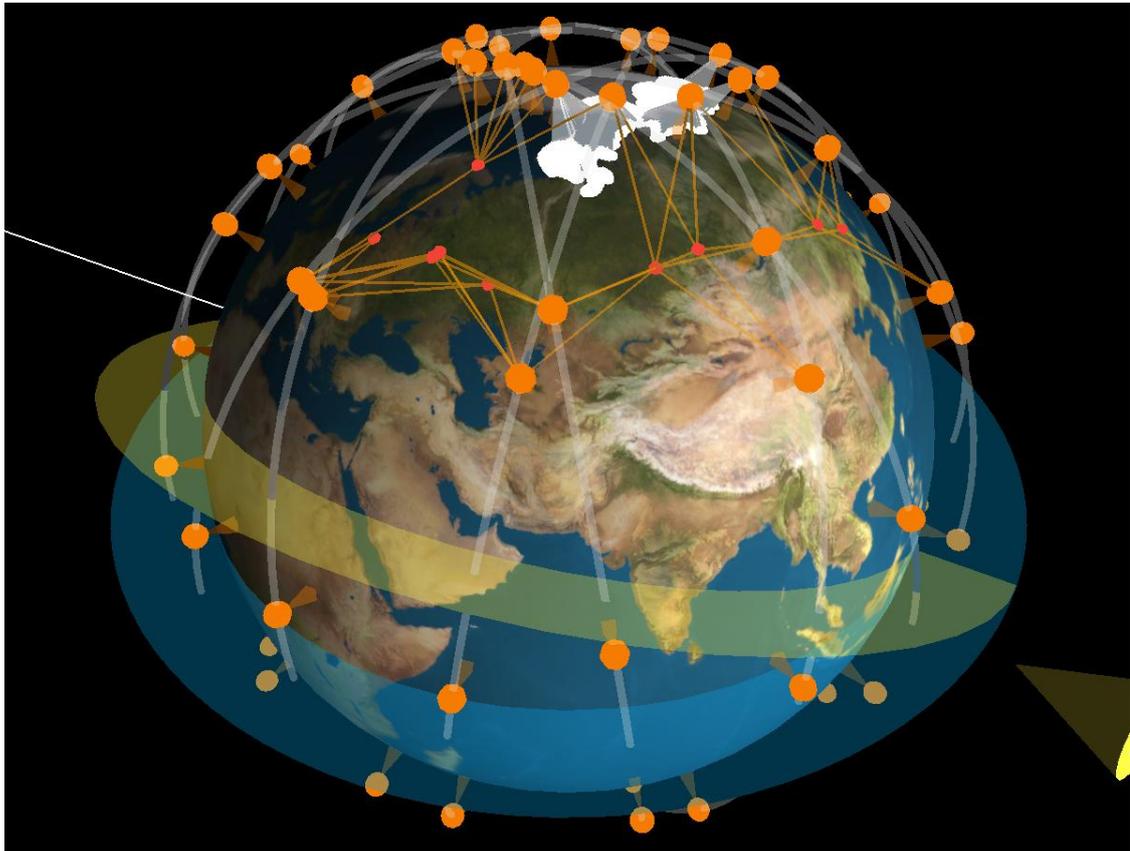


Рисунок 4.38 – Процесс имитационного моделирования

Таблица 4.13 – Географическое расположение НППИ

№	Наименование	Широта, град	Долгота, град
1	Железногорск	56.25292	93.53226
2	Мурманск	68.96958	33.07456
3	Новосибирск	55.03020	82.92043
4	Обнинск	55.11201	36.58653
5	Самара	53.19554	50.10178
6	Хабаровск	48.48022	135.0719
7	Циолковский	51.78803	128.1316

На рисунке 4.39 приведён суммарный объем информации, приходящийся на каждую станцию. Показано, что для обеспечения приёма достаточно 7 из 10 НППИ ЕТРИС ДЗЗ.

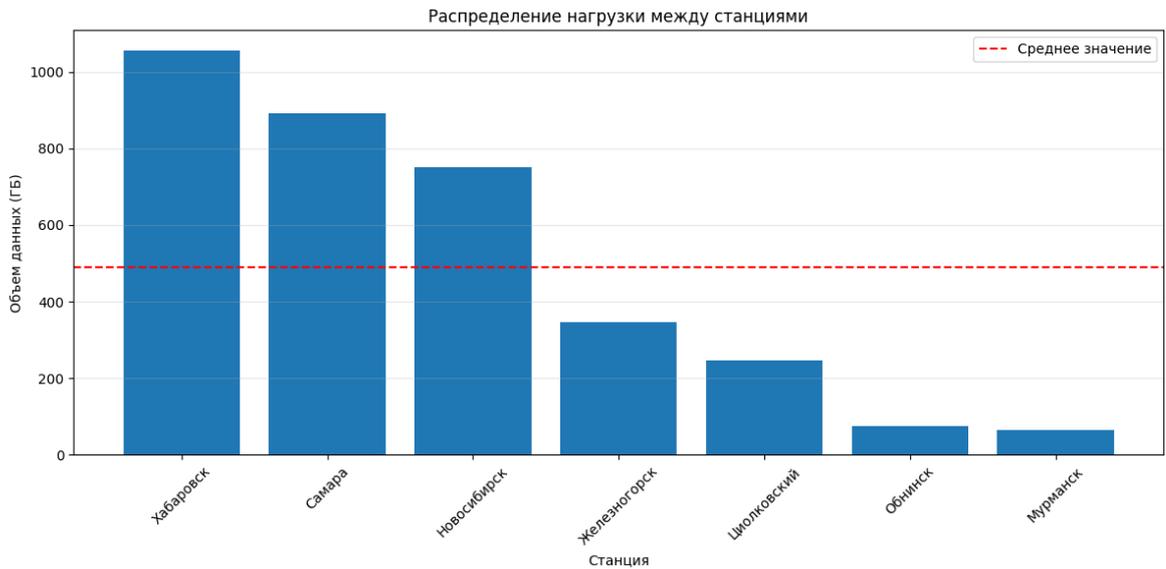


Рисунок 4.39 – График распределения нагрузки между станциями

При моделировании функционирования космической системы предполагалось, что съёмка происходит при любых условиях освещенности, межспутниковые линии связи отсутствуют, накопленная информация передаётся на первую наземную станцию после съёмки. Полигон акватории СМП был разбит сеткой точек с шагом $0,3^\circ$ по долготе и широте. Для оценки оперативности доставки каждой точки на НППИ использовались следующие параметры: задержка перед съёмкой после передачи данных (60 секунд) – позволяет задать время необходимое для перехода системы ориентации из режима наведения на НППИ в режим съёмки земной поверхности; задержка перед отправкой данных после съёмки (1200 секунд) – позволяет задать время необходимое для сохранения и обработки информации на борту КА.

На рисунке 4.40 приведена тепловая карта средней оперативности доставки информации.

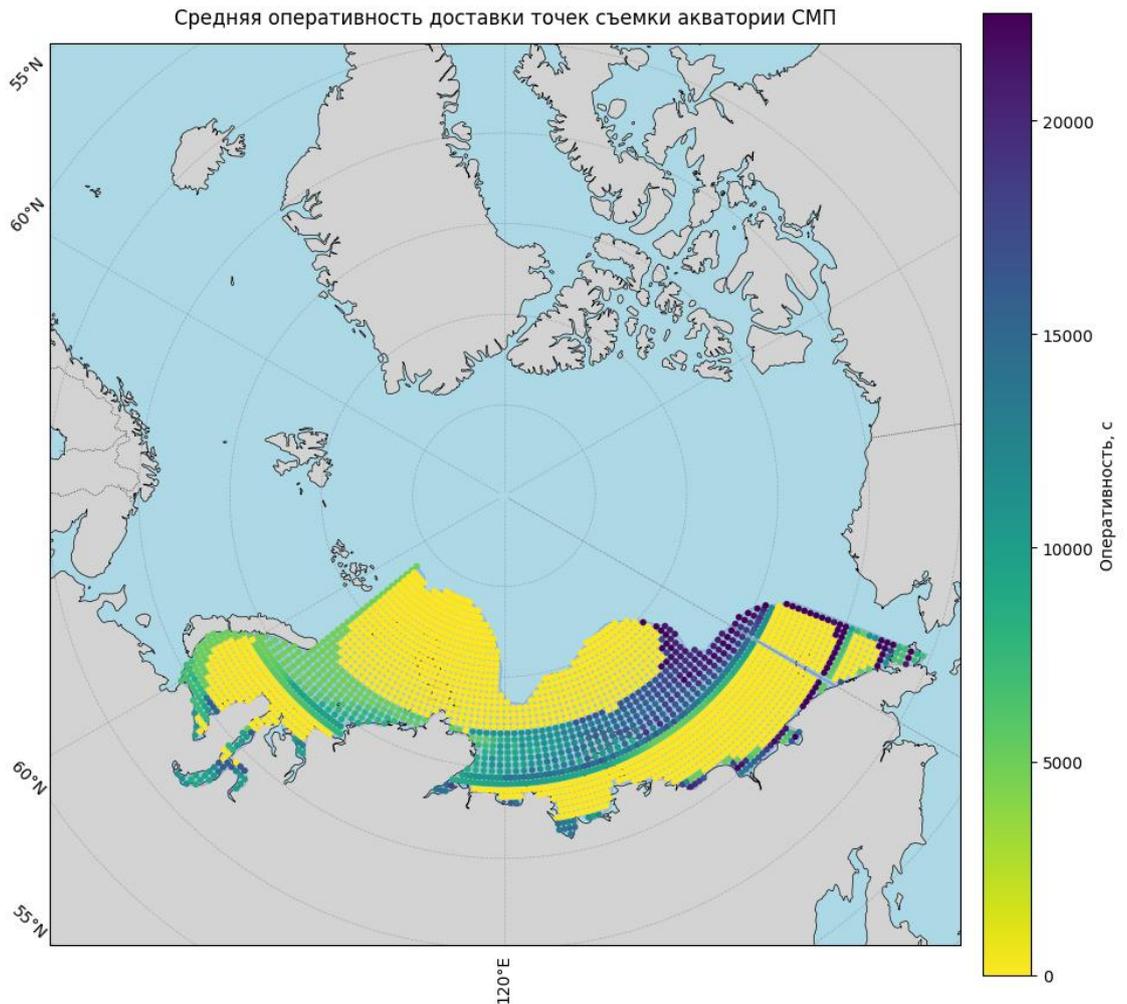


Рисунок 4.40 – Тепловая карта средней оперативности доставки информации точек съемки акватории СМП

Достигнутая минимальная оперативность составляет порядка 57 минут, наихудшая оперативность достигает 12,5 часов. При этом более 80% информации об СМП доставляется на приемные станции с оперативностью не хуже 1,4 часа.

Анализ результатов моделирования показывает, что предложенная конфигурация наземных станций приема обеспечивает требуемые показатели оперативности доставки информации для большинства задач мониторинга СМП. Для критически важных районов достигается оперативность менее 2 часов, что соответствует требованиям к системе. Семь станций ЕТРИС ДЗЗ (Железногорск, Мурманск, Новосибирск, Обнинск, Самара, Хабаровск, Циолковский) обеспечивают полное покрытие потребностей в приеме данных от группировки радиолокационных КА.

4.7.3.3 Сравнительный анализ солнечно-синхронных и высокоэллиптических орбит типа «Молния»

Для мониторинга Арктики целесообразно рассмотреть альтернативные орбитальные построения, включая высокоэллиптические орбиты (ВЭО) типа "Молния", которые обладают рядом преимуществ для наблюдения высокоширотных регионов.

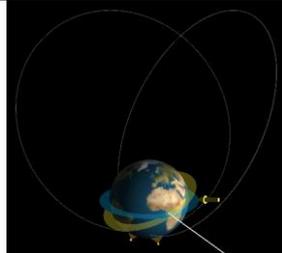
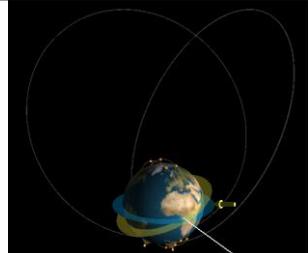
Ключевыми преимуществами ВЭО для мониторинга Арктики являются длительное время наблюдения, высокая оперативность, непрерывный мониторинг и большая зона покрытия. Космический аппарат, функционирующий на ВЭО, находится над Арктикой около восьми часов за виток, что обеспечивает продолжительное наблюдение за регионом. Использование трех КА позволяет обеспечить непрерывный мониторинг арктической зоны. С высоты апогея КА охватывает всю арктическую область, что позволяет получить полное представление о состоянии региона.

В связи с этим могут быть использованы комбинированные орбитальные построения космических систем, объединяющие преимущества глобальности обзора КС ДЗЗ на ВЭО и возможности высокодетального мониторинга низкоорбитальных систем. Рассмотрим показатели эффективности мониторинга КС «Арктика-М» и их комбинацию с рассматриваемыми в настоящем разделе КС. Сравнительный анализ орбитальных построений для мониторинга СМП приведен в таблице 4.14.

Результаты моделирования показывают, что для обеспечения требуемых характеристик мониторинга СМП оптимальным является использование комбинированной системы, включающей: 2 КА на высокоэллиптических орбитах типа "Молния" для оперативного мониторинга и обеспечения непрерывного наблюдения критически важных районов; 20 КА на солнечно-синхронных орбитах для детальной съемки с высоким пространственным разрешением.

Такая архитектура обеспечивает покрытие 100% акватории СМП с периодичностью наблюдения критически важных районов не более 2-4 часов при существенном сокращении общего количества требуемых космических аппаратов.

Таблица 4.14 – Сравнительный анализ орбитальных построений для мониторинга СМП

Параметр	Предлагаемая система на ССО	«Арктика-М»	Комбинированная система
Орбитальная структура ССО	97.8: 90,9,0	-	97.8: 20,2,0
Орбитальные параметры ВЭО	-	Наклонение: 63.4° Апогей: 40000 км Перигей: 1000 км	Наклонение: 63.4° Апогей: 40000 км Перигей: 1000 км
Пространственное разрешение	1–3 метра	10–50 метров	1–50 метров
Количество КА для квазинепрерывного обзора СМП	90	2	20 ССО КА 2 ВЭО КА
Средняя периодичность наблюдения	1-5 часов	15-30 минут	15-30 минут
Средняя оперативность доставки информации	2.5 часа	1–2 часа	1–2 часа
Процент покрытия СМП	97.7% (до 83° с.ш.)	100%	100%
			

Достигнутые в результате моделирования показатели периодичности наблюдений (4-24 часа в зависимости от важности района) и оперативности доставки информации (15 минут - 24 часа в зависимости от приоритета задачи) соответствуют международному уровню современных космических систем радиолокационного мониторинга и обеспечивают решение стратегических задач развития Арктической зоны Российской Федерации.

Техническая реализуемость системы с предложенными характеристиками подтверждается анализом существующих зарубежных аналогов. Создание такой системы позволит обеспечить технологическую независимость России в области арктического мониторинга и повысить эффективность использования транспортного потенциала Северного морского пути.

4.8 Выводы по четвертой главе

В данной главе были получены следующие основные результаты:

1) Проведён анализ проектных параметров целевого информационного тракта низкоорбитального КА ДЗЗ. Показано, что с увеличением высоты орбиты снижается информационный поток, но увеличивается полоса захвата. Для высоты 350 км информационный поток для панхроматической камеры составляет 11 Гбит/с, что является оптимальным с точки зрения баланса между объёмом данных и разрешающей способностью.

2) Выполнен выбор орбитальных параметров группировки низкоорбитальных КА. В результате многокритериальной оптимизации определено, что оптимальными параметрами являются высота 350 км и наклонение $96,85^\circ$, соответствующие солнечно-синхронной орбите.

3) Выполнен поиск оптимального расположения наземных пунктов приёма информации. Определено оптимальное количество и географическое расположение наземных пунктов приёма информации для трёх вариантов спутниковых группировок.

4) Проведена оценка периодичности наблюдения локальных районов Земли и оперативность доставки информации различными вариантами группировок. Рассмотрены три варианта: 42 КА в 7 плоскостях, 54 КА в 9 плоскостях и 72 КА в 9 плоскостях. Все варианты обеспечивают покрытие более 94% поверхности Земли с учётом ограничений на освещённость. Вариант №3 (54 КА в 9 плоскостях) обеспечивает среднюю периодичность наблюдения 6533 секунд (около 1,82 часа), что является оптимальным соотношением между характеристиками системы и затратами на её создание.

5) Выполнен анализ показателей функционирования радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли в решении задач мониторинга Арктического региона и Северного морского пути. Разработаны требования к космической системе радиолокационного мониторинга акватории Северного морского пути.

б) Разработаны предложения по созданию радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли для решения задач мониторинга Северного морского пути. Определены проектные параметры систем и произведена оценка показателей их функционирования. Показано, что оптимальной архитектурой для мониторинга СМП является комбинированная система, интегрирующая 2 КА на высокоэллиптических орбитах (типа «Молния») для обеспечения непрерывного наблюдения и 20 КА на солнечно-синхронных орбитах для высокодетальной съемки. Данное решение обеспечивает 100% покрытие акватории с высокой периодичностью (от 15–30 минут для ВЭО до 2–4 часов для ССО).

Таким образом, разработанная методика и программный комплекс позволяют эффективно оценивать параметры многоспутниковых группировок ДЗЗ и выбирать оптимальные проектные решения с учётом различных критериев эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого диссертационного исследования разработана методика оценки показателей функционирования низкоорбитальных многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли, учитывающая информационное взаимодействие орбитальной группировки и наземных станций приёма. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана методика выбора расположения наземных станций приёма для низкоорбитальных многоспутниковых группировок. Выбор координат размещения станций осуществляется жадным алгоритмом с целевой функцией минимизации количества используемых станций при ограничениях на непересечение временных интервалов радиовидимости и выполнение требований по суточному времени передачи данных для каждого космического аппарата. Методика позволяет сократить количество наземных станций приёма при обеспечении требуемой оперативности доставки информации.

2. Разработана масштабируемая агрегированная имитационная модель для оценки целевых показателей функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, позволяющая анализировать конфигурации до двухсот космических аппаратов и произвольным количеством наземных станций. В модели осуществляется моделирование работы целевой аппаратуры наблюдения с расчётом объёма генерируемых данных, состояние бортовой памяти космических аппаратов рассчитывается интегрированием скоростей поступления данных от целевой аппаратуры и передачи на наземные станции, а сеансы связи моделируются с использованием очередей передачи данных.

3. Разработана методика оценки показателей функционирования многоспутниковых космических систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования орбитального движения с использованием дискретной модели земной поверхности в виде регулярной сетки точек. Для каждой точки сетки вычисляются временные ряды наблюдений с расчётом статистических характеристик. Методика позволяет получать количественные оценки процента

покрытия заданного региона, периодичности наблюдения и оперативности доставки информации в зависимости от варьируемых параметров орбитальной группировки, характеристик целевой аппаратуры и расположения наземных станций приёма.

4. Разработан и реализован программный комплекс для моделирования функционирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ, имеющий модульную архитектуру. Комплекс включает модули выбора проектных характеристик систем, моделирования целевого функционирования и оценки показателей эффективности.

5. Проведена апробация разработанных методик, имитационной модели и программного комплекса на примере проектирования низкоорбитальных космических систем ДЗЗ. Выполнен анализ целевого информационного тракта группировки, проведена оценка оперативности доставки информации наблюдения на наземные станции приёма. Разработаны тепловые карты, демонстрирующие распределение показателей периодичности наблюдения и оперативности доставки информации для различных регионов Земли, в том числе Арктического региона и акватории Северного морского пути.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с расширением разработанной методики и моделей для учёта межспутниковых линий связи и передачи данных через спутники-ретрансляторы, включая геостационарные или высокоорбитальные аппараты; интеграцией разработанного подхода с методами интеллектуального планирования целевого применения космических систем ДЗЗ; адаптацией методики для оценки показателей функционирования многоуровневых систем наблюдения, включающих низкоорбитальные, высокоорбитальные космические и авиационные средства ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Иванушкин, М.А. Многоспутниковые группировки дистанционного зондирования Земли. Современное состояние и перспективы развития [Текст] / М.А. Иванушкин, И.С. Ткаченко // Сборник тезисов XLV Академических чтений по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. – 2021. – Т. 1. – С. 65–69.
- 2 Kulu, E. Satellite Constellations - 2024 Survey, Trends and Analysis [Text] // Proceedings of the 75th International Astronautical Congress (IAC 2024). – Milan, Italy, 2024. – IAC-24-B4.2.1.
- 3 Bryce Reports [Электронный ресурс]. Smallsats by the Numbers 2025. – Режим доступа: <https://brycetech.com/reports/report-documents/smallsats-2025/> (дата обращения: 24.05.2025).
- 4 Earth Observation in 2024 and Outlook for 2025 [Электронный ресурс] // Terrawatch Space Newsletter. – Режим доступа: <https://newsletter.terrawatchspace.com/earth-observation-in-2024-and-outlook-for-2025/> (дата обращения: 24.05.2025).
- 5 Сафронов, С.Л. Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ [Текст]: монография / С.Л. Сафронов, И.С. Ткаченко, М.А. Иванушкин, С.С. Волгин; под ред. В.В. Салмина. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2019. – 276 с.
- 6 Ткаченко, И.С. Информационная система поддержки предварительного проектирования малых космических аппаратов [Текст] / И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов, М.Д. Коровин, М.А. Иванушкин, А.В. Крестина // Онтология проектирования. – 2023. – Т. 47, № 1. – С. 75–89.
- 7 Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview [Text] / T. Villela, S.A. Costa, A.M. Brandão, F.T. Bueno, R. Leonardi // International Journal of Aerospace Engineering. – 2019. – Vol. 2019. – Art. 5063145. – 13 p. – DOI: 10.1155/2019/5063145.
- 8 Ткаченко, И.С. Архитектура информационного компонента наземной инфраструктуры для управления перспективными многоспутниковыми системами

на базе данных телеметрических измерений [Текст] / И.С. Ткаченко, М.А. Иванушкин // Авиакосмическое приборостроение. – 2025. – № 3. – С. 3–14. – DOI: 10.25791/aviakosmos.3.2025.1465.

9 Технические характеристики спутников компании Planet [Электронный ресурс] // PlanetScore. – Режим доступа: <https://docs.planet.com/data/imagery/planetscore/> (дата обращения: 24.05.2025).

10 Состав орбитальной группировки компании Planet [Электронный ресурс] // Planet Satellite Operational Report. – Режим доступа: https://ephemerides.planet-labs.com/operational_status.txt (дата обращения: 24.05.2025).

11 Roy, D.P. A global analysis of the temporal availability of PlanetScope high spatial resolution multi-spectral imagery [Text]/ D.P. Roy, H. Huang, R. Houborg, V.S. Martins // Remote Sensing of Environment. – 2021. – Vol. 264. – Art. 112586. – DOI: 10.1016/j.rse.2021.112586.

12 Технические характеристики спутников компании BlackSky [Электронный ресурс] // BlackSky Constellation. – Режим доступа: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/blacksky-constellation/> (дата обращения: 24.05.2025).

13 Технические характеристики спутников компании Maxar [Электронный ресурс] // WorldView Legion. – Режим доступа: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/worldview-legion/> (дата обращения: 24.05.2025).

14 Технические характеристики спутников Pleiades [Электронный ресурс] // Pleiades Neo Satellite Constellation. – Режим доступа: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/pleiades-neo/> (дата обращения: 24.05.2025).

15 Технические характеристики спутников SPOT [Электронный ресурс] // SPOT-7 Satellite Sensor. – Режим доступа: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-7/> (дата обращения: 24.05.2025).

16 Sentinel-1 [Электронный ресурс] // NASA's Earth Science Data Systems. – Режим доступа: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/platforms/space-based-platforms/sentinel-1> (дата обращения: 15.09.2025).

17 Кирилин, А.Н. Космический аппарат «Ресурс-П» [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.И. Бакланов, Н.Р. Стратилатов, В.М. Федоров, М.В. Новиков // Геоматика. – 2010. – № 4. – С. 23–26.

18 Горбунов, А.В. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» [Текст] / А.В. Горбунов, И.Н. Слободский // Геоматика. – 2010. – № 1. – С. 30–33.

19 Космический комплекс «Метеор-3М» [Электронный ресурс] // Научный центр оперативного мониторинга Земли. – Режим доступа: <https://ntsomz.ru/meteor-3m/> (дата обращения: 15.09.2025).

20 Космические аппараты типа «Арктика-М» [Электронный ресурс] // Научный центр оперативного мониторинга Земли. – Режим доступа: <https://ntsomz.ru/arktika-m/> (дата обращения: 15.09.2025).

21 Севастьянов, Д.Н. Группировка космических аппаратов «Смотр-В» и «Смотр-Р» - задачи и основные характеристики [Текст] / Д.Н. Севастьянов, А.В. Яковлев, Е.В. Филиппов, А.В. Пашкин, В.А. Лазутин, А.С. Вахтанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 22-й Междунар. конф. – М.: ИКИ РАН, 2024. – С. 489. – DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.

22 Космический аппарат «Кондор-ФКА» [Электронный ресурс] // Научный центр оперативного мониторинга Земли. – Режим доступа: https://ntsomz.ru/kondor_fka_1/ (дата обращения: 15.09.2025).

23 Ignatenko, V. ICEYE Microsatellite SAR Constellation: SAR data quality improvements and new Dwell imaging mode [Text] / V. Ignatenko, O. Dogan, A. Radius, M. Nottingham, D. Muff, L. Lamentowski, P. Leprovost, R. Vehmas, T. Seilonen, P. Vilja // EUSAR 2024; 15th European Conference on Synthetic Aperture Radar: Proceedings. – Munich, Germany, 2024. – P. 1118–1192.

24 Stringham, C. The Capella X-band SAR Constellation for Rapid Imaging [Text] / C. Stringham, G. Farquharson, D. Castelletti, E.B. Quist, L. Riggi, D. Eddy, S.A. Soenen // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2019. – P. 9248–9251. – DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8900410.

25 Doyon, M. RADARSAT Constellation Mission: Toward Launch and Operations [Text] / M. Doyon, J. Smyth, G. Kroupnik, C. Carrie, M. Sauvageau, J.-F. Levesque, F. Babiker, V. Abbasi, C. Giguere, S. Côté, J. Bergeron // 2018 SpaceOps Conference. – 2018. – AIAA 2018-2605. – DOI: 10.2514/6.2018-2605.

26 Дмитриева, Е.А. К определению путей решения проблемы оперативного телекоммуникационного обслуживания космических аппаратов многоспутниковых систем дистанционного зондирования Земли [Текст] / Е.А. Дмитриева, Т.К. Кривоклякин, С.А. Матвеев, А.В. Савченко, В.Г. Шучев // Космонавтика и ракетостроение. – 2022. – № 5(128). – С. 24–43.

27 Емельянова, А.В. Мировые тенденции развития наземной инфраструктуры космических систем дистанционного зондирования Земли [Текст] / А.В. Емельянова, Н.П. Ковалевский, А.Л. Яровой // Космонавтика и ракетостроение. – 2021. – № 2(119). – С. 151–163.

28 Малышев, В.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление [Текст] / В.В. Малышев, М.Н. Красильщиков, В.Т. Бобронников, О.П. Нестеренко, А.В. Федоров ; Под редакцией В.В. Малышева. – М. : Изд-во МАИ, 2000. – 568 с.: ил.

29 Куренков, В.И. Основы проектирования космических аппаратов опτικο-электронного наблюдения поверхности Земли. Расчёт основных характеристик и формирование проектного облика [Текст]: учебное пособие / В. И. Куренков. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2020. – 461 с.: ил.

30 Лебедев, А.А. Основы синтеза систем летательных аппаратов [Текст] / А.А. Лебедев, Г.Г. Аджимамудов, В.Н. Баранов [и др.]; Под ред. А.А. Лебедева. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 444 с.

31 Малышев, В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления [Текст] / В.В. Малышев. – М.: МАИ – ПРИНТ, 2010. – 440 с.

32 Ханцеверов, Ф.Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли [Текст] / Ф. Р. Ханцеверов, В. В. Остроухов. – М.: Машиностроение, 1989. – 263с.

33 Соллогуб, А.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА [Текст] / А.В. Соллогуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов ; Под ред. Д.И. Козлова. – М.: Машиностроение, 1993. – 368 с.

34 Кирилин, А.Н. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов, С.И. Ткаченко, А.И. Бакланов, В.В. Салмин, Н.Д. Семкин, И.С. Ткаченко, О.В. Горячкин – Самара: Изд-во «СамНЦ РАН», 2017. – 324 с

35 Кирилин, А.Н. Основные проектные характеристики малых космических аппаратов научного и прикладного назначений на базе унифицированной платформы "АИСТ-2" [Текст] / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.И. Бакланов, Н.Р. Стратилатов, В.И. Абрашкин, Е.В. Космодемьянский, С.И. Ткаченко, В.В. Салмин, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов // Космическая техника и технологии. – 2020. – Т. 31, № 4. – С. 5-20.

36 Akhmetov, R «AIST-2D»: Results of flight tests and application of earth remote sensing data for solving thematic problems [Text] / R. Akhmetov, A. Filatov, R. Khalilov, S. Raube, M. Borisov, V. Salmin, I. Tkachenko, S. Safronov, M. Ivanushkin // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2023. – Vol. 26, No. 3. – P. 427-454. – DOI 10.1016/j.ejrs.2023.06.003.

37 Аншаков, Г.П. Проведение проектных исследований в обеспечение создания и отработки технологий сетевого взаимодействия многоуровневых космических группировок гибкого и оперативного мониторинга Земли с различными типами целевой аппаратуры [Текст] / Г.П. Аншаков, В.В. Салмин, В.И. Куренков, И.С. Ткаченко // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2019. –Т. 1. – С. 32-34.

38 Баринoв, К.Н. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов [Текст] / К.Н. Баринoв, М.Н. Бурдаев, П.А. Мамон. – М.: «Машиностроение», 1975. – 232 с.

- 39 Vargo, L.G. Orbital patterns for satellite systems [Text] / L.G. Vargo // Journal of the Astronautical Sciences. – 1960. – Vol. 7, № 4. – P. 78.
- 40 Luders, R.D. Satellite networks for continuous zonal coverage [Text] / R.D. Luders // ARS Journal. – 1961. – Vol. 31, № 2. – P. 179.
- 41 Gobetz, F.W. Satellite networks for global coverage [Text] / F.W. Gobetz // Journal of the Astronautical Sciences. – 1961. – Vol. 8, № 4. – P. 114.
- 42 Ullock, M.H. Optimum Polar Satellite Networks for Continuous Earth Coverage [Text] / M.H. Ullock, A.H. Shoen // AIAA Journal. – 1963. – Vol. 1. – PP. 69–72.
- 43 Easton, R.L. Continuous visible satellite constellations [Text] / R.L. Easton, R. Brescia // National Research Laboratory. Reports 6896. – Washington (DC), 1969. – 45 p.
- 44 Можаяев, Г. В. К проблеме оптимизации орбит спутниковых систем, предназначенных для непрерывного обзора поверхности Земли [Текст] / Г.В. Можаяев // Третий Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике : аннот. докладов. – М., 1968. – С. 215.
- 45 Можаяев, Г.В. Задача о непрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы. Часть 2 [Текст] / Г.В. Можаяев // Космические исследования. – 1973. – Т. 11. № 1. – С. 59–69.
- 46 Можаяев, Г.В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем: (Теоретико-групповой подход) [Текст] / Г.В. Можаяев. – М. : Машиностроение, 1989. – 303 с.
- 47 Walker, J.G. Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage [Text] / J.G. Walker // Royal Aircraft Establishment. Technical Report 70211. – Farnborough (England), 1970. – 45 p.
- 48 Walker, J.G. Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage [Text] / J.G. Walker // Journal of British Interplanetary Society. – 1971. – Vol. 24, № 11. – PP. 369–384.
- 49 Walker, J.G. Satellite constellations [Text] / J.G. Walker // Journal of British Interplanetary Society. – 1984. – Vol. 37, № 12. – P. 559.

50 Lang, T. J. Walker constellations to minimize revisit time in low earth orbit [Text] / T. J. Lang // Proc. of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference. AAS 03-178. – 2003.

51 Бырков, Б.П. Аналитическая методика определения периодичности обзора Земли спутником системы ИПРЗ [Текст] / Б.П. Бырков, Ю.Н. Разумный // Исследование Земли из космоса. – 1992. – № 2. – С. 91–97.

52 Разумный, Ю.Н. Метод оптимизации параметров одномаршрутных систем ИСЗ для периодического обзора Земли [Текст] / Ю.Н. Разумный // Исследование Земли из космоса. – 1991. – № 5. – С. 39–46.

53 Саульский, В.К. Оптимальные орбиты и структура систем ИСЗ для периодического обзора Земли [Текст] / В.К. Саульский // Исследование Земли из космоса. – 1989. – № 2. – С. 104–115.

54 Lang, T.J. LEO Constellations to Cover the Earth in One Rev [Text] / T.J. Lang // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, 4–7 August 2014, San Diego, CA. – AIAA Paper 2014–4156.

55 Ulybyshev, Y. General Analysis Method for Discontinuous Coverage Satellite Constellations [Text] / Y. Ulybyshev // Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 2015. – Vol. 38, № 12. – PP. 2475–2483.

56 Лысенко, А.А. Выбор параметров орбиты космического аппарата для оперативного глобального мониторинга поверхности Земли [Текст] / А.А. Лысенко, С.Ю. Улыбышев // Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 5. – С. 45–56.

57 Улыбышев, С.Ю. Применение солнечно-синхронных орбит для космического аппарата оперативного глобального мониторинга [Текст] / С.Ю. Улыбышев // Космические исследования. – 2016. – Т. 54, № 6. – С. 486–492. – DOI: 10.7868/S002342061606011X.

58 ГОСТ Р 70665-2023. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Космические системы дистанционного зондирования Земли. Показатели эффективности. – Введ. 01.01.2024. – М. : Стандартинформ, 2023. – 16 с.

59 Старков, А.В. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли Часть 1. Формализация

задачи [Текст] / А.В. Старков, А.А. Емельянов, Л.А. Гришанцева, К.И. Жуковская, А.А. Морозов, А.А. Тришин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 54-64. – DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-1-54-64.

60 Дарнопых, В.В. Автоматизация параметрического анализа целевого функционирования космических систем дистанционного зондирования Земли [Текст] / В.В. Дарнопых, И.В. Усовик // Труды МАИ. – 2011. – № 47. – С. 10.

61 Зайцев, В.В. Расчет длительности наблюдения при радиолокационной съемке [Текст] / В.В. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т. 65, № 9. – С. 685-695. – DOI 10.17586/0021-3454-2022-65-9-685-695.

62 Wertz, J.R. Space Mission Engineering: The New SMAD [Text] / J.R. Wertz, D.F. Everett, J.J. Puschell. – Hawthorne, CA: Microcosm Press, 2011. – 800 p.

63 Старков, А.В. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей [Текст] / А.В. Старков, А.А. Емельянов, Л.А. Гришанцева, К.И. Жуковская, А.А. Морозов, А.А. Тришин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – Т. 22, № 2. – С. 148-161. – DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161.

64 Старков, А.В. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 3. Результаты применения [Текст] / А.В. Старков, А.А. Емельянов, Л.А. Гришанцева, К.И. Жуковская, А.А. Морозов, А.А. Тришин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 247-260. – DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-3-247-260.

65 Pavlov, D. Алгоритмы планирования передачи данных от космических аппаратов на наземные станции [Текст] / D. Pavlov, A. Kodukov, M. Subbotin // Computer Tools in Education. – 2025. – № 1. – С. 108–117.

66 Балухто, А.Н. Технология мультиагентного управления маршрутизацией данных в многоспутниковых сетевых системах дистанционного зондирования земли / А.Н. Балухто // Космонавтика и ракетостроение. – 2021. – № 3. – С. 85–97.

67 Tian, M. Optimizing satellite ground station facilities scheduling for RSGS: a novel model and algorithm [Text] / M. Tian, G. Ma, P. Huang, B. Cheng, W. Li // International Journal of Digital Earth. – 2023. – Vol. 16, Iss. 1. – PP. 3949–3972. – DOI: 10.1080/17538947.2023.2259870.

68 Jiang, Y. Multi-ground station system-based link allocation strategy for satellite constellation [Text] / Y. Jiang, W. He, W. Liu, S. WU, X. WEI, Q. MO // Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. – 2025. – Vol. 51, no. 4. – P. 1224–1233. – DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0177.

69 Eddy, D. Optimal Ground Station Selection for Low-Earth Orbiting Satellites [Text] / D. Eddy, M. Ho, M. Kochenderfer // arXiv e-prints. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2410.16282.

70 Baeza, V.M. Multi-Criteria Ground Segment Dimensioning for Non-Geostationary Satellite Constellations [Text] / V.M. Baeza, F. Ortiz, E. Lagunas, T.S. Abdu, S. Chatzinotas // 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit): Proceedings. – Gothenburg, Sweden, 2023. – P. 252–257. – DOI: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188237.

71 Vasisht, D.A Distributed and Hybrid Ground Station Network for Low Earth Orbit Satellites [Text] / D. Vasisht, R. Chandra // Proceedings of the 19th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '20). – New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2020. – P. 190–196. – DOI: 10.1145/3422604.3425926.

72 Vallado, D.A. Revisiting Spacetrack Report #3 [Text] / D.A. Vallado, P. Crawford, R. Hujsak, T.S. Kelso // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit: Proceedings. – Keystone, Colorado, 2006. – AIAA 2006-6753. – DOI: 10.2514/6.2006-6753.

73 Space-Track [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.space-track.org> (дата обращения: 10.03.2025).

74 CelesTrak [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://celestrak.org/> (дата обращения: 10.03.2025).

75 Данные в формате TLE для МКА «АИСТ-1» [Электронный ресурс] // CelesTrak. – Режим доступа: <https://celestrak.org/NORAD/elements/graph-orbit-data.php?CATNR=39133> (дата обращения: 10.03.2025).

76 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614620. Программа Constellation modeler (ConMod) для моделирования целевого функционирования космической системы мониторинга / В.В. Салмин, В.И. Куренков, И.В. Кауров, А.В. Крестина, М.А. Иванушкин, И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов – Заявка №2022686687. Дата поступления 29 декабря 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03 марта 2023 г.

77 Salmin, V.V. Modeling of onboard systems operation of small satellites based on general logical-probabilistic method [Text] / V.V. Salmin, I.S. Tkachenko, M.A. Ivanushkin, S.S. Volgin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. Issue 1. – DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012086.

78 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612104. Программа Russian Space System Developer (RSSD) для моделирования целевого функционирования и оценки эффективности многоспутниковых космических систем различного назначения / И.С. Ткаченко, С.Л. Сафронов, М.А. Иванушкин, И.В. Кауров. – Заявка №2023610597. Дата поступления 17 января 2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 30 января 2023 г.

79 Волоцуев, В.В. Низкоорбитальные космические аппараты высокодетального наблюдения с длительным сроком существования на рабочих орбитах высотой ниже четырехсот километров [Текст] / В.В. Волоцуев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 12(120). – 17 с. – DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2135.

80 Шахматов, Е.В. Проектирование низкоорбитальных малых космических аппаратов с оптической аппаратурой наблюдения и корректирующей электрореактивной двигательной установкой [Текст] / Е.В. Шахматов, В.В. Салмин, В.В. Волоцуев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая

техника, технологии и машиностроение. – 2025. – Т. 24, № 1. – С. 72–84. – DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-1-72-84.

81 VLEO Innovator: Earth Observant Inc. [Электронный ресурс]. – New Space Economy. – 2023. – Режим доступа: <https://newspaceseconomy.ca/2023/06/03/vleo-innovator-earth-observant-inc/> (дата обращения: 19.05.2025).

82 Иванушкин, М.А. Оценка эффективности многоспутниковых космических систем дистанционного зондирования Земли [Текст] / М.А. Иванушкин, И.С. Ткаченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 101–110. – DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-101-110.

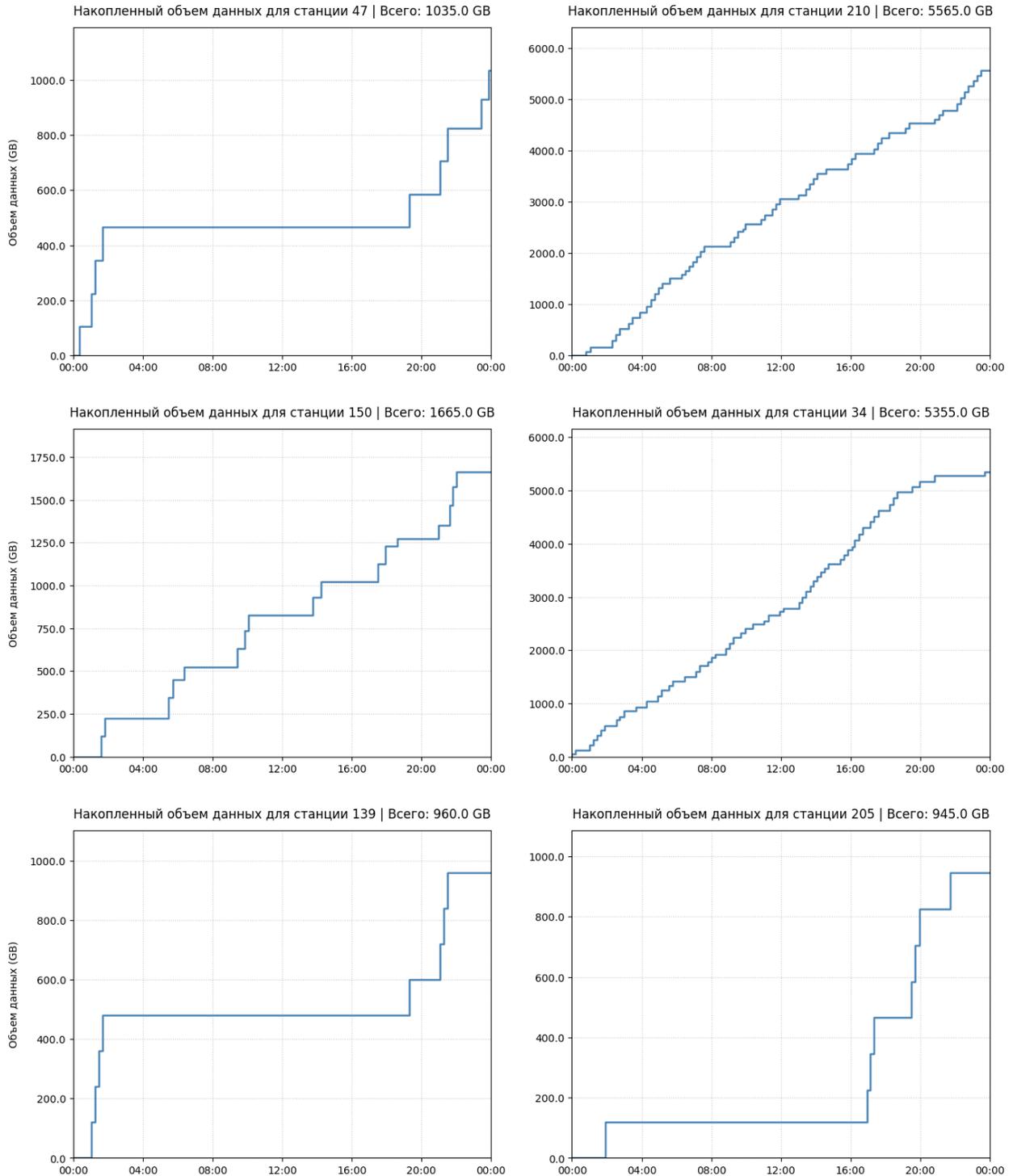
83 Иванушкин, М.А. Оценка проектных характеристик низкоорбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли [Текст] / М.А. Иванушкин, О.Д. Жалдыбина // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 5. – С. 85–96. – DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-85-96.

84 Ivanushkin, M. Design methodology for a multi-satellite global continuous observation system of the Earth [Text] / M. Ivanushkin, I. Tkachenko, A. Krestina // 2022 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2022. – 2022. – DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848609.

85 Salmin, V.V. Determination of the main design parameters of cost-effective remote sensing satellite systems at the stage of preliminary design [Text] / V.V. Salmin, V.I. Kurenkov, S.L. Safronov, I.S. Tkachenko, A.A. Yakischik, M.A. Ivanushkin, S.S. Volgin, A.V. Krestina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. – Issue 1. – P. 012089. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012089.

86 Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс] // Справочно-правовая система «Гарант». – Режим доступа: <https://base.garant.ru/74664152/> (дата обращения: 15.09.2025).

Приложение А

Результаты моделирования информационного обмена спутниковых группировок
и наземных станцийРисунок А.1 – Результаты моделирования накопления данных станциями для
варианта №1

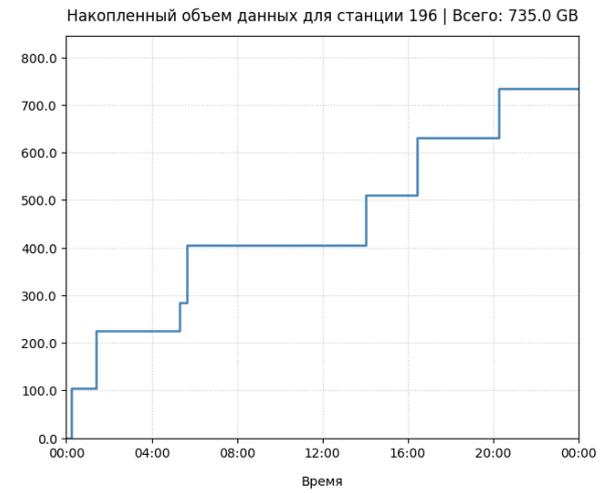
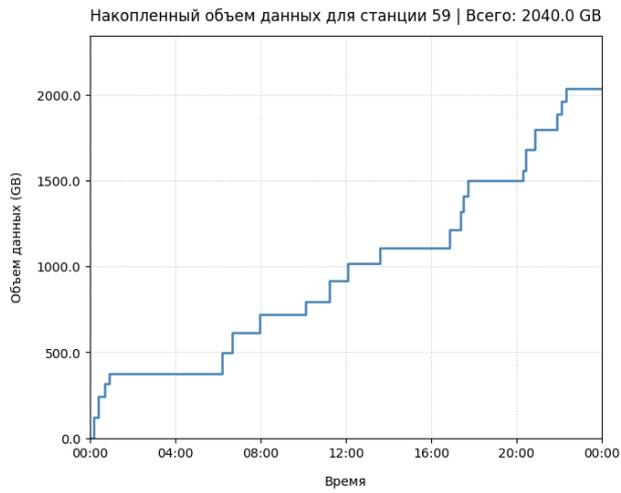
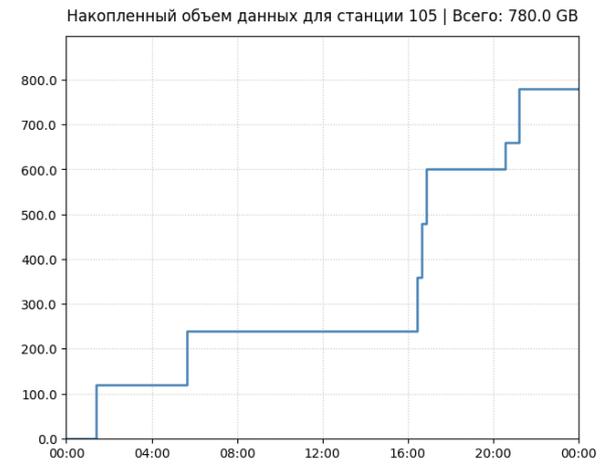
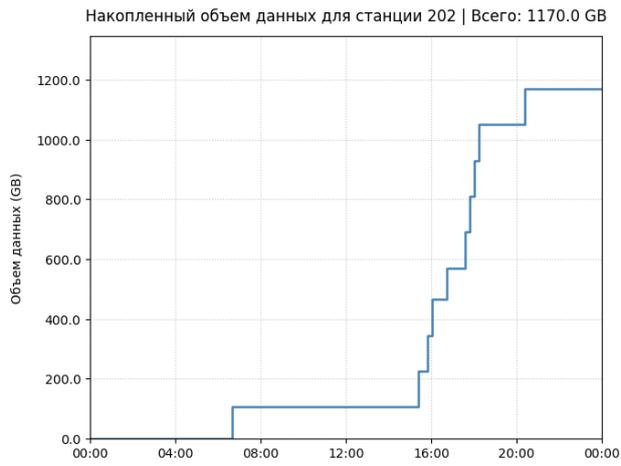
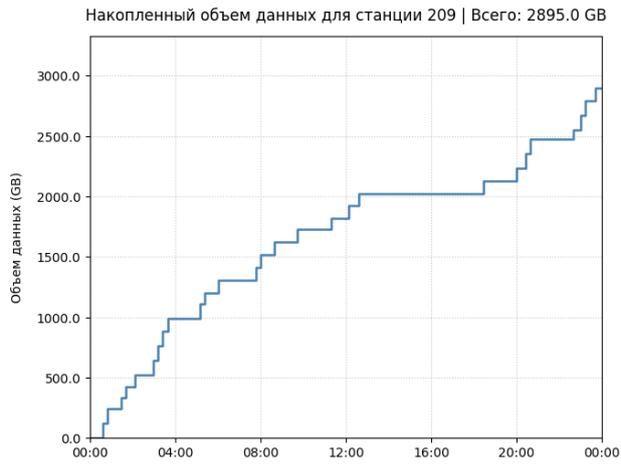


Рисунок А.2 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №1

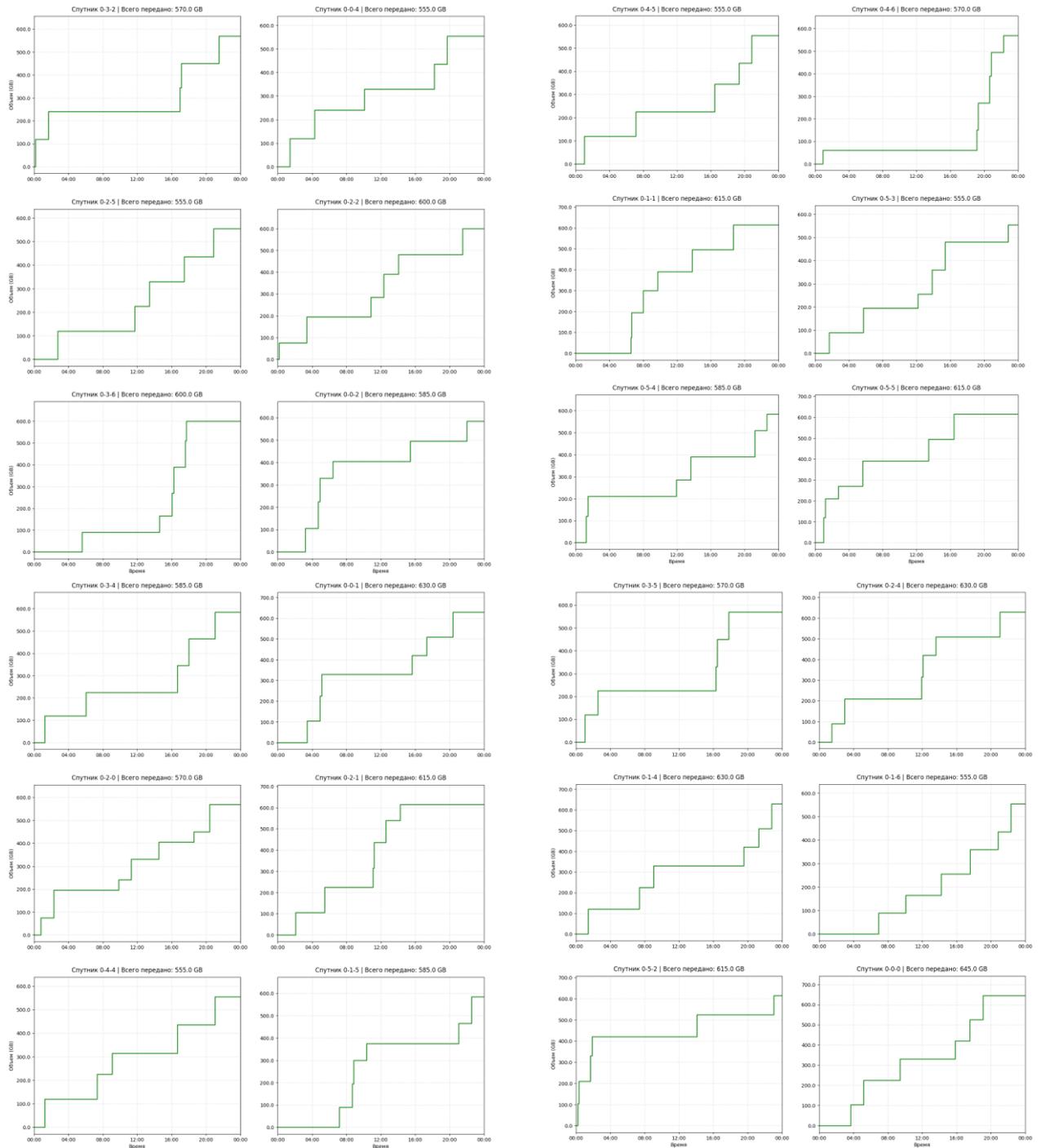


Рисунок А.3 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №1

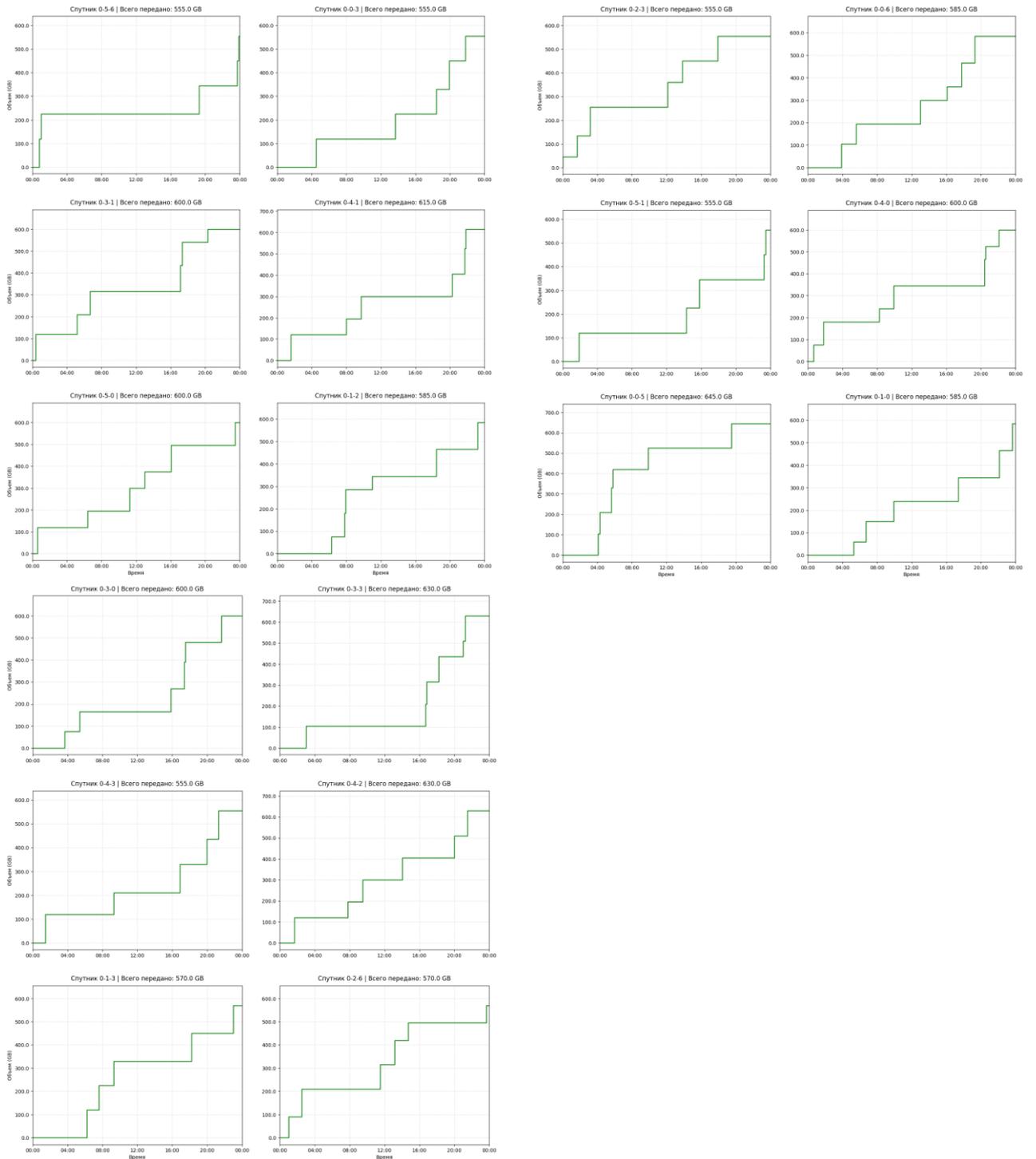


Рисунок А.3 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №1

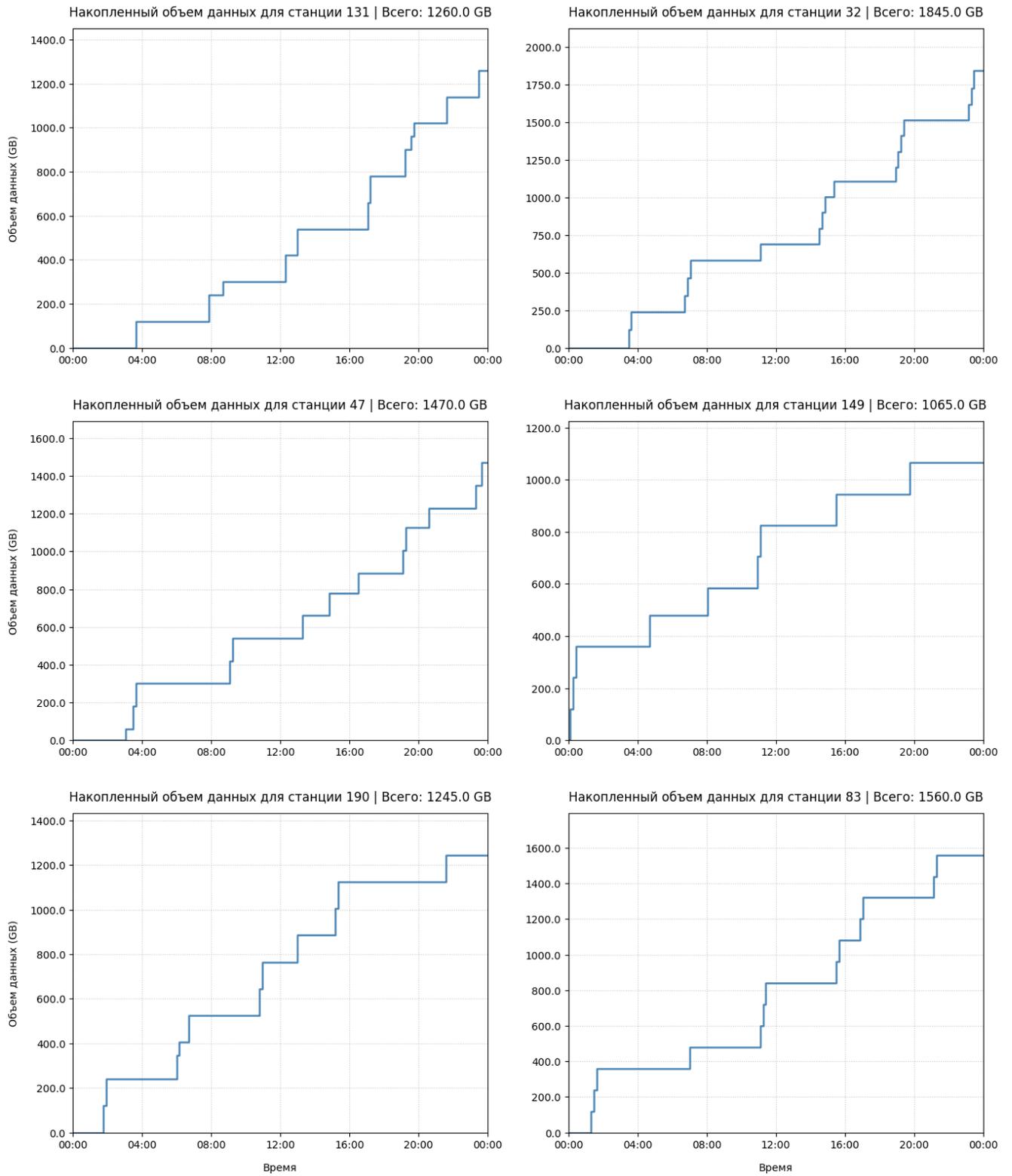


Рисунок А.4 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №3

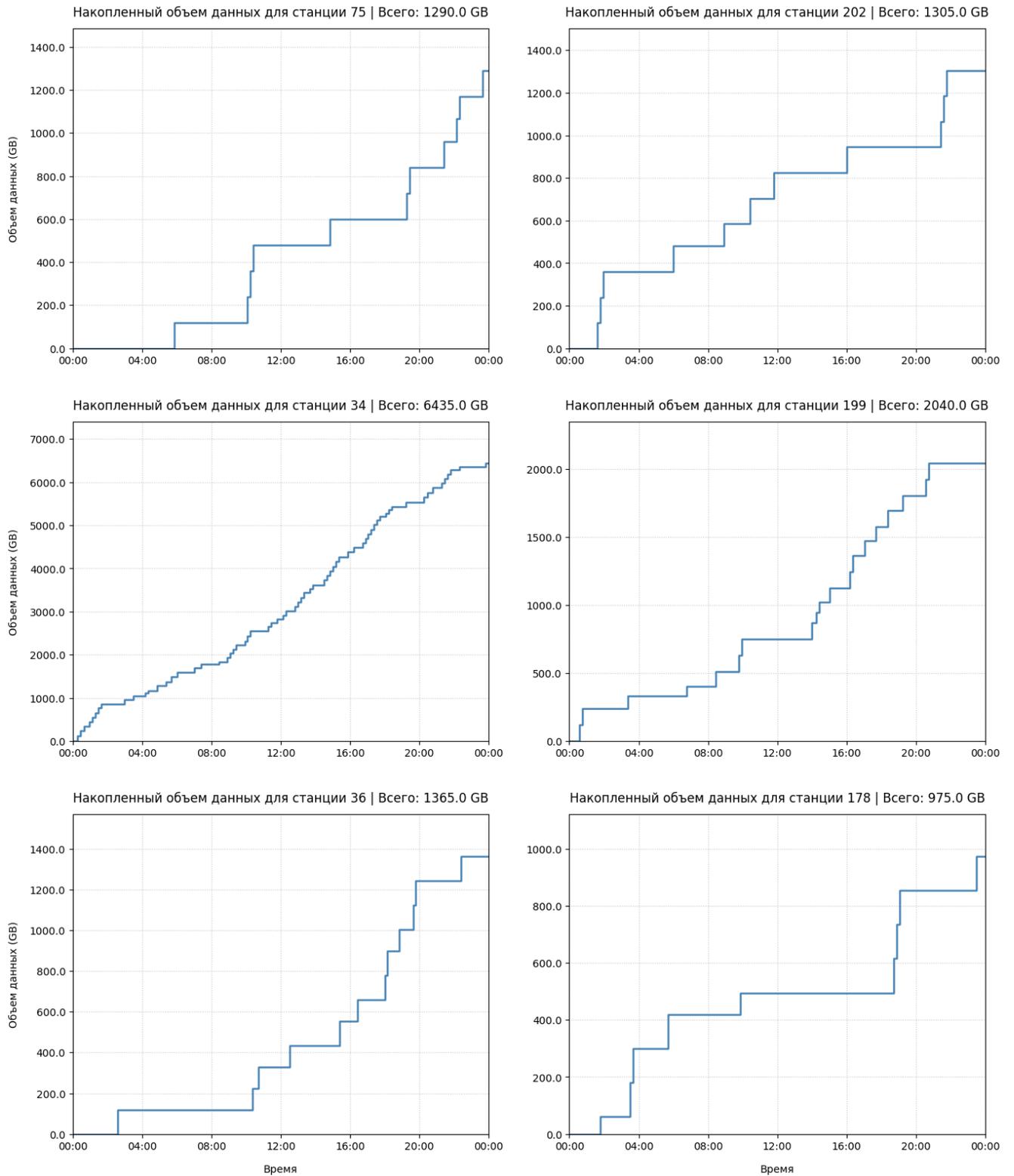


Рисунок А.5 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №3

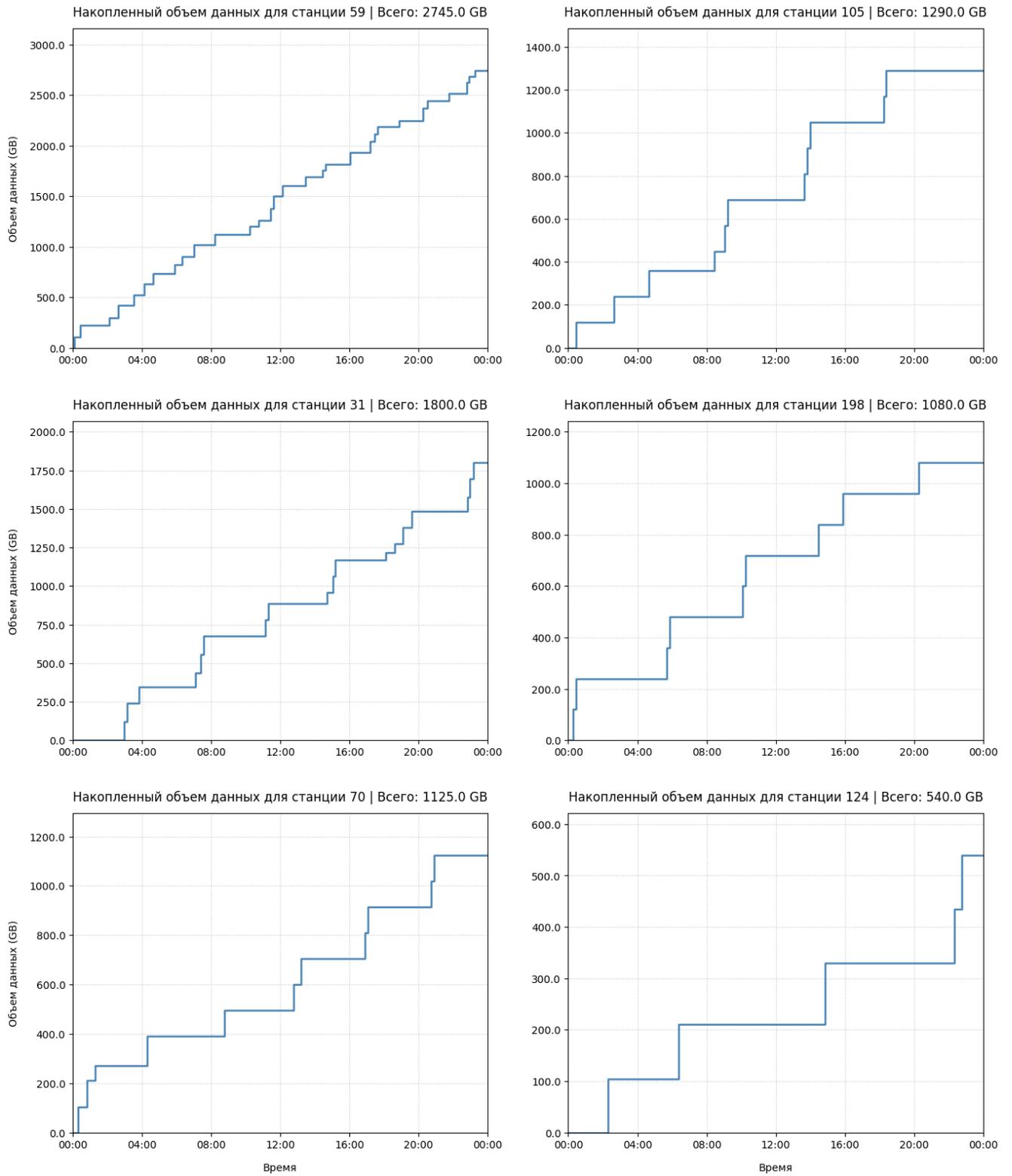


Рисунок А.6 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №3

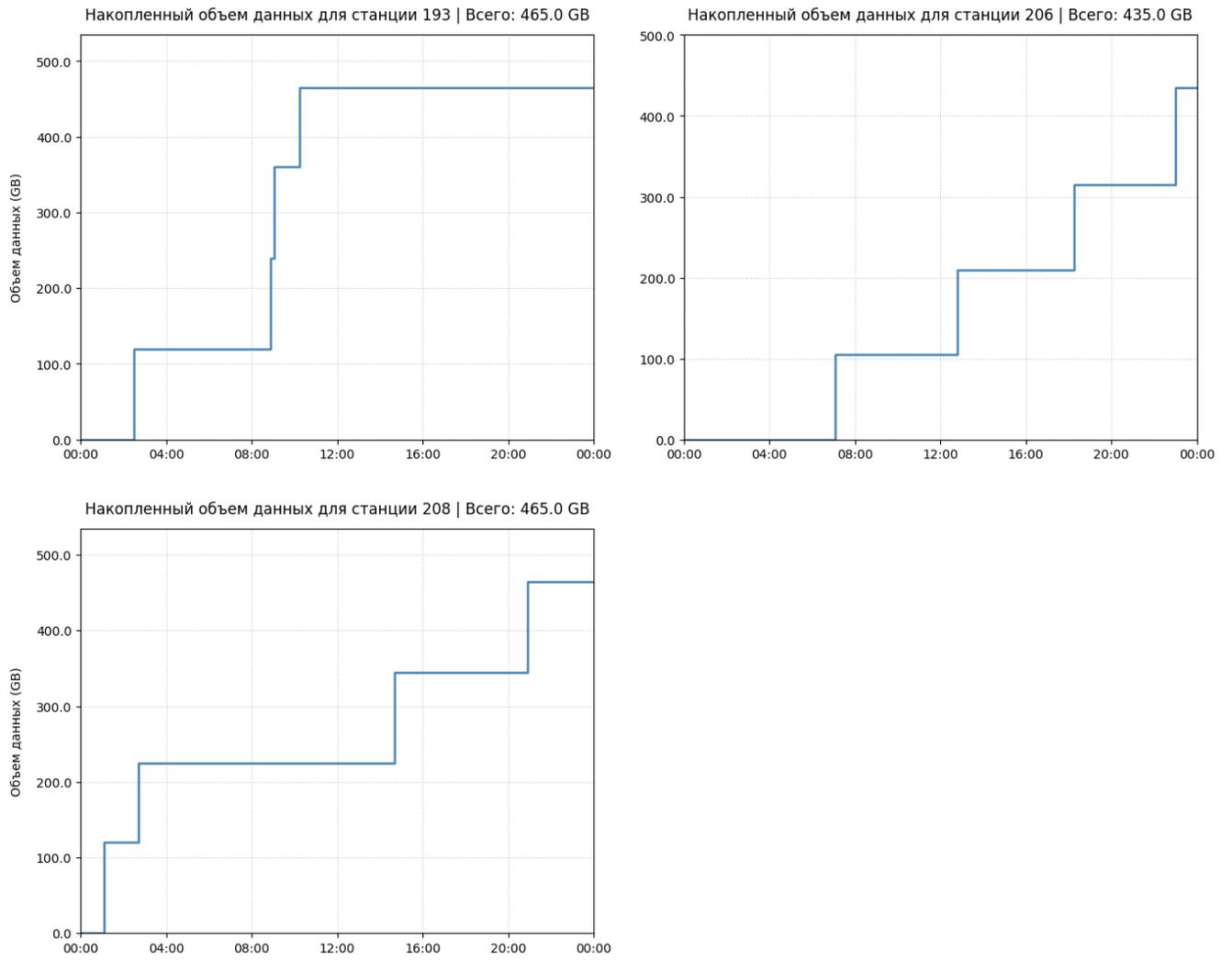


Рисунок А.7 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №3

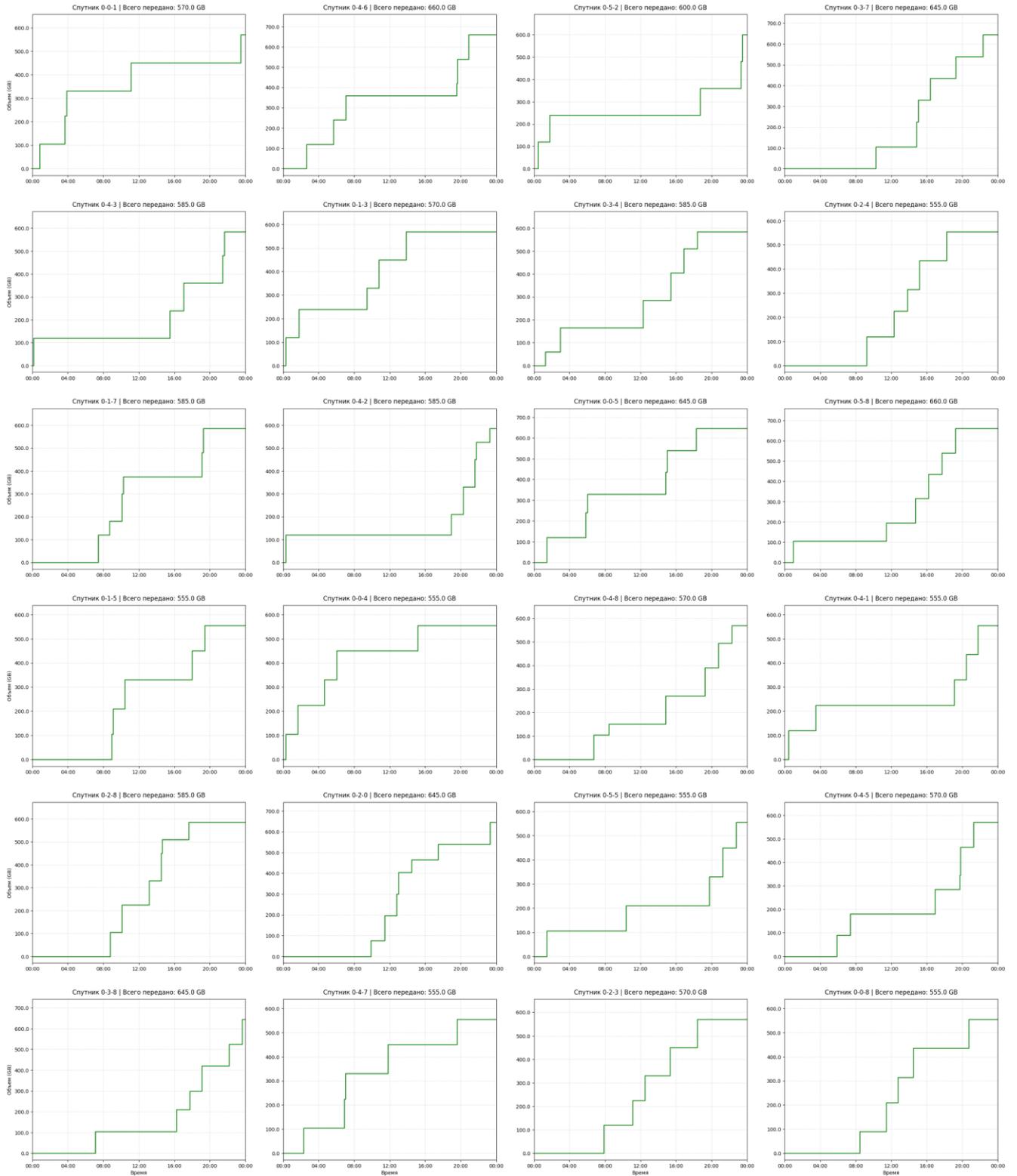


Рисунок А.8 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №3

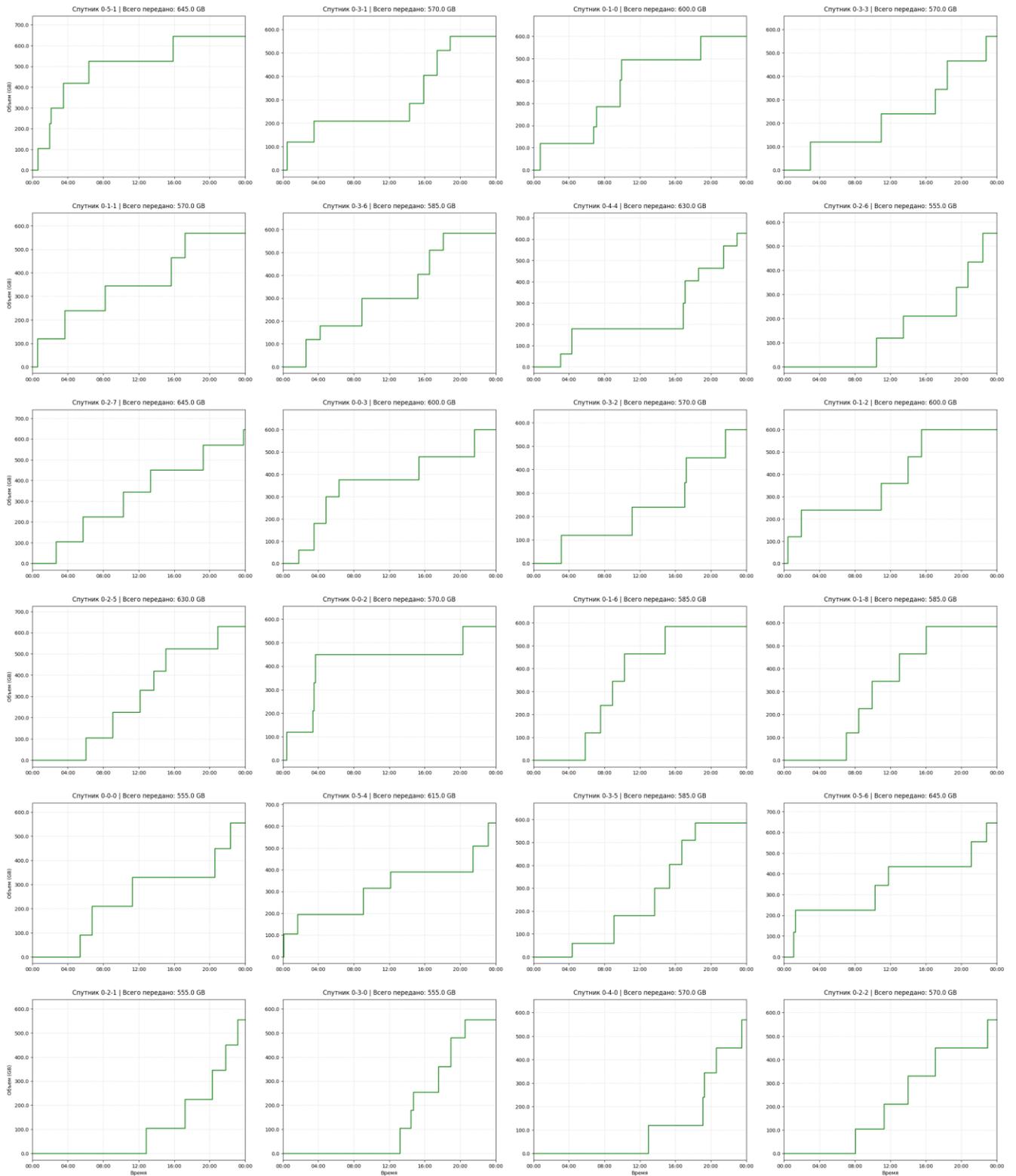


Рисунок А.9 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №3

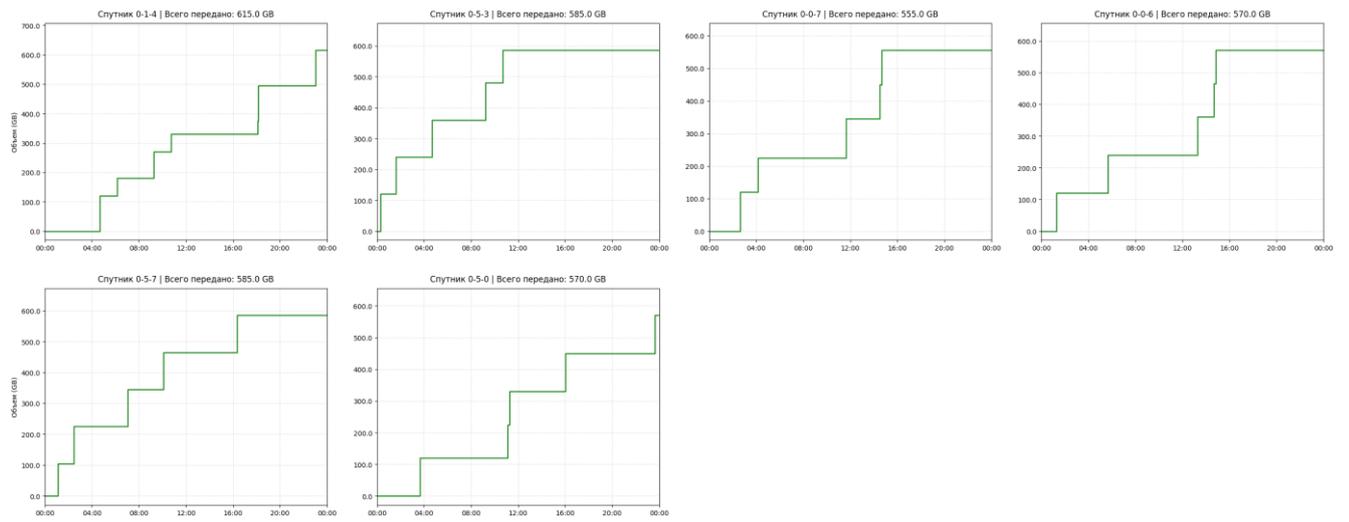


Рисунок А.10 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №3

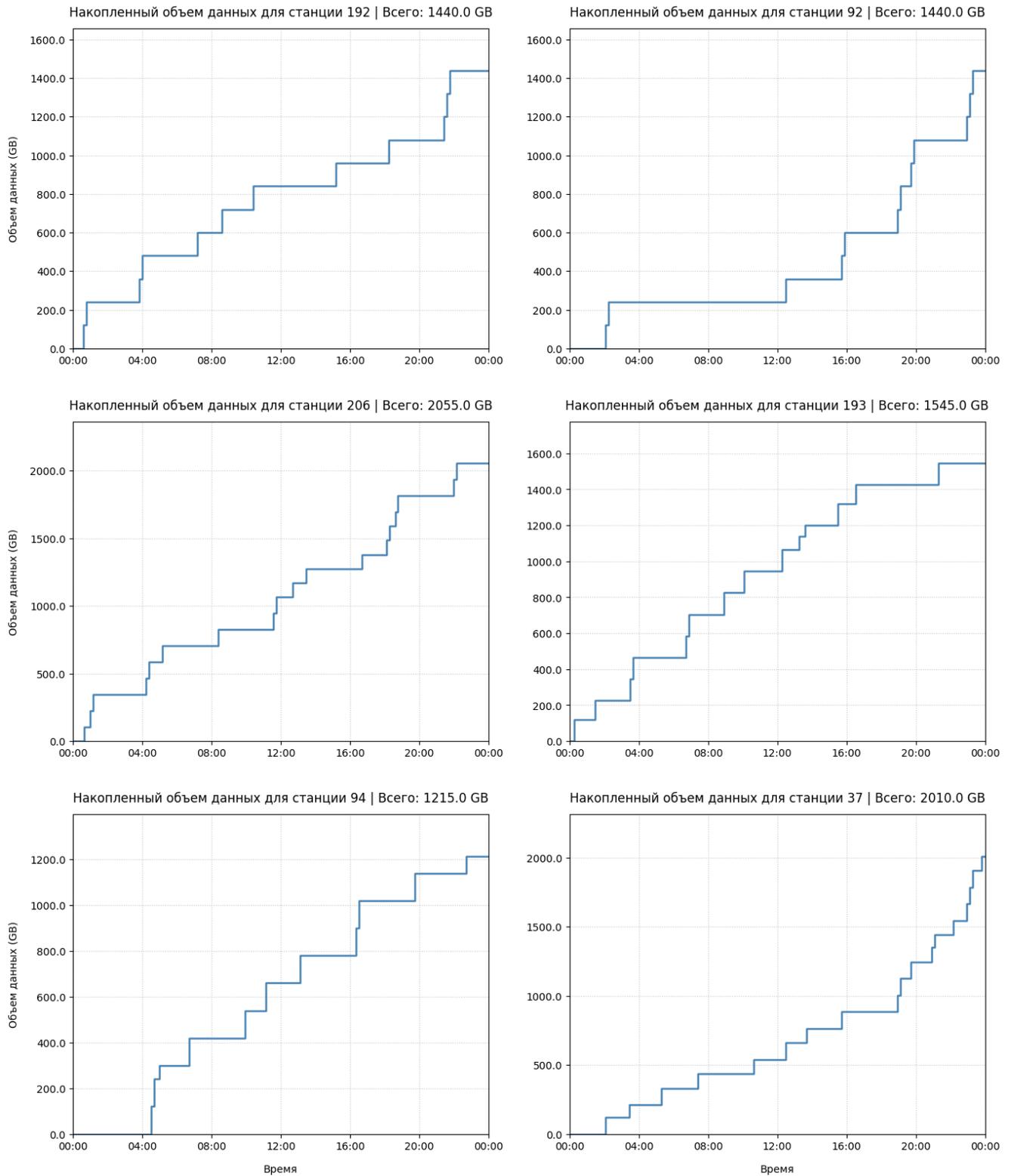


Рисунок А.11 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №5

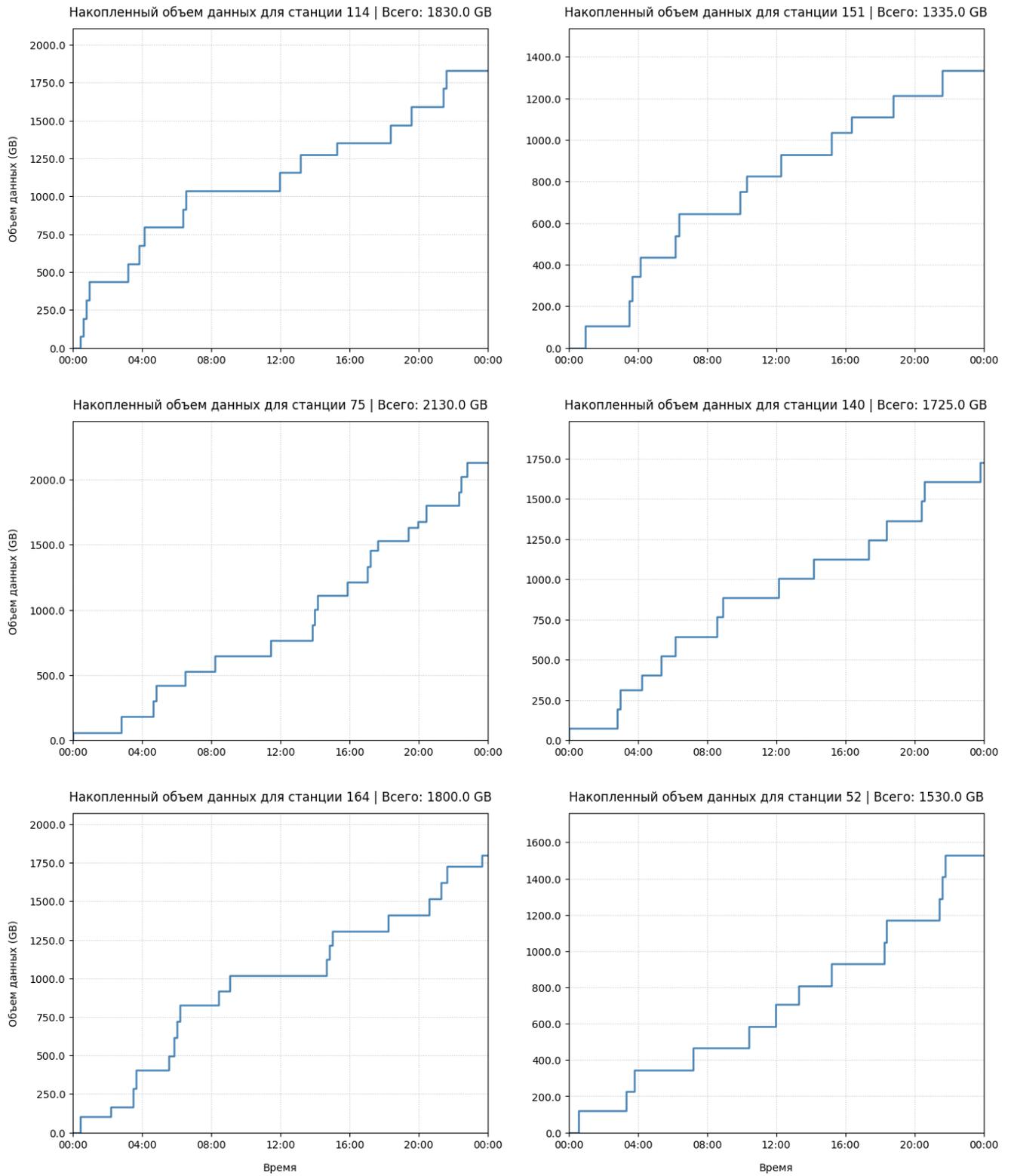


Рисунок А.12 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №5

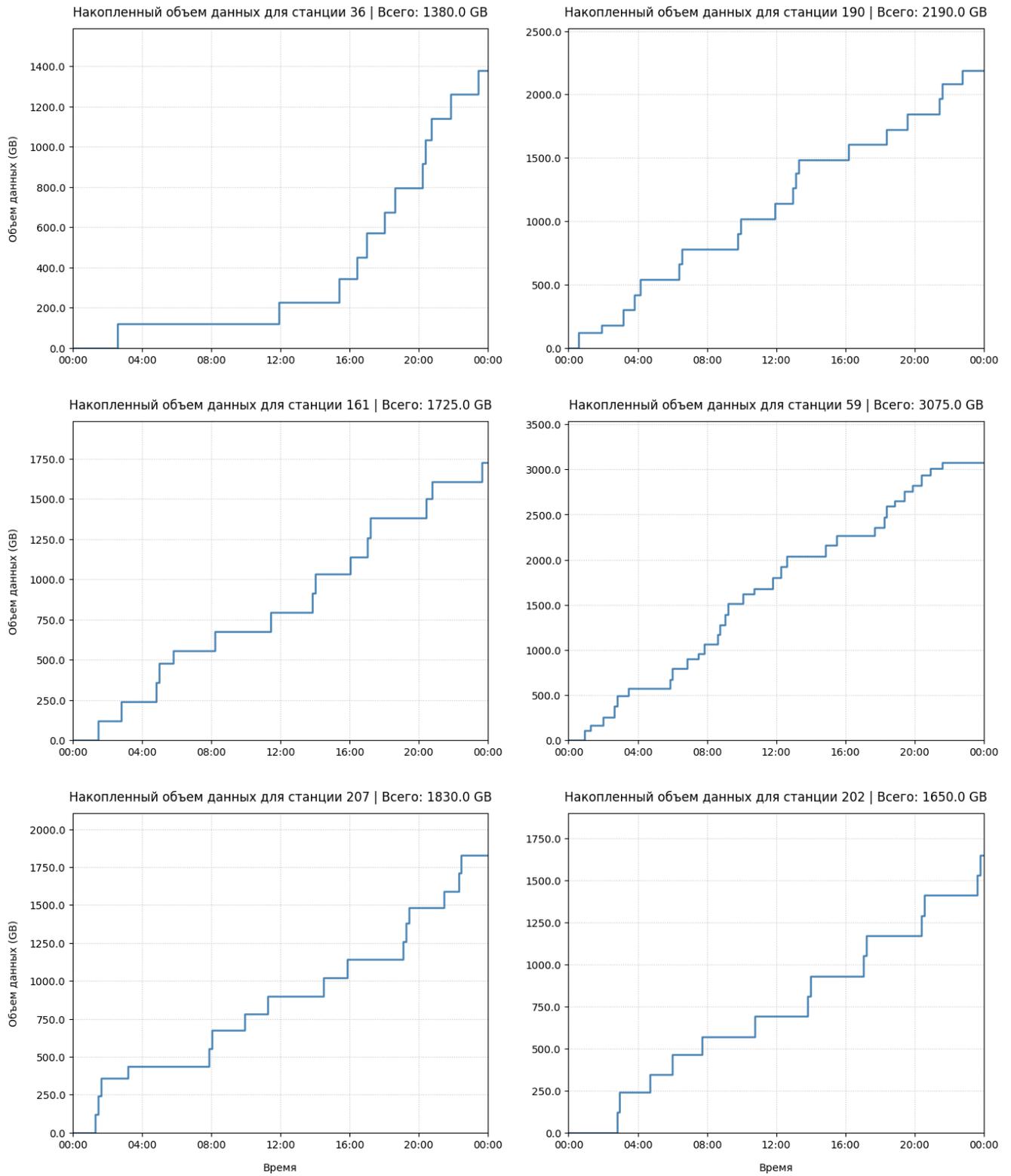


Рисунок А.13 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №5

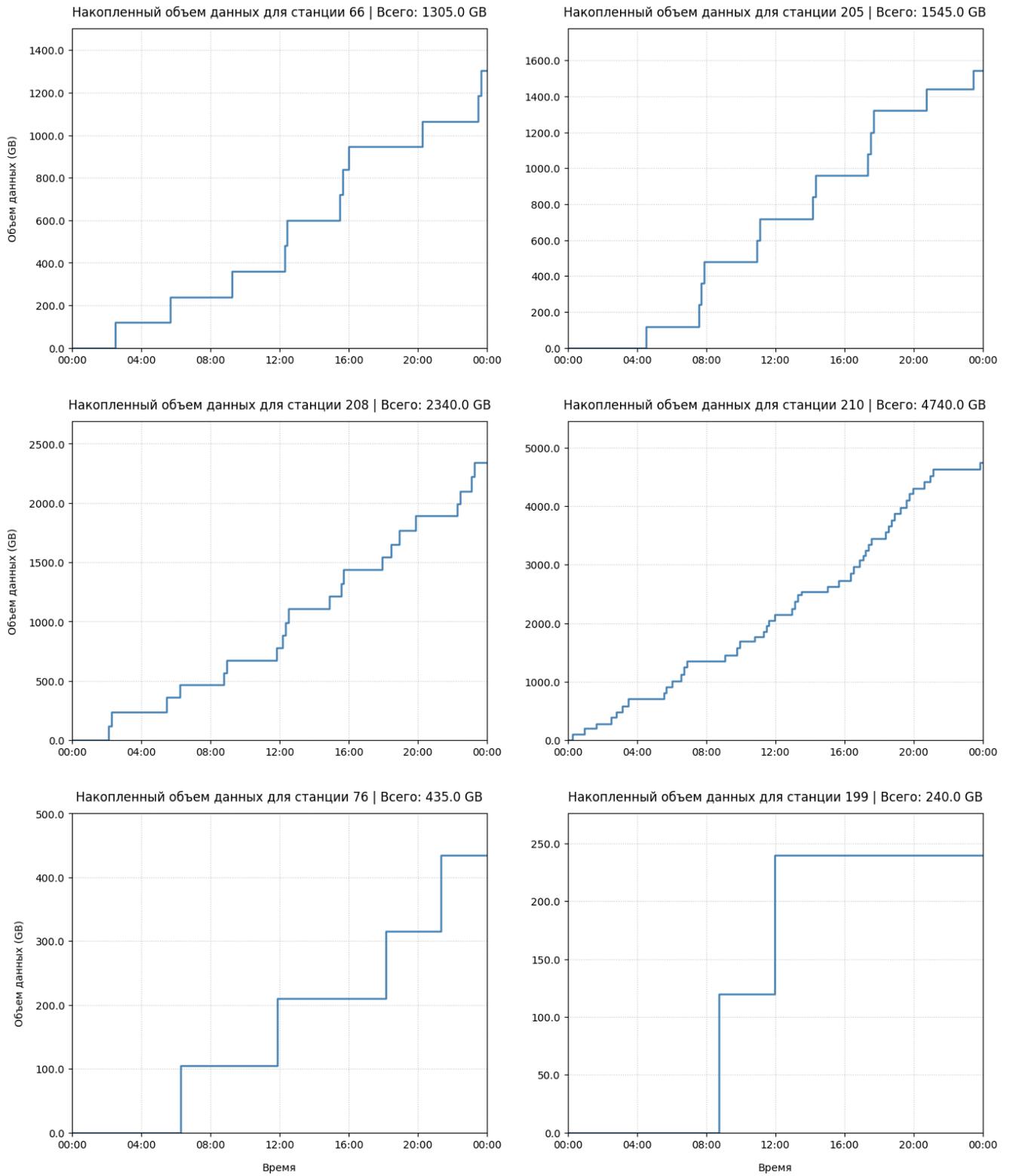


Рисунок А.14 – Результаты моделирования накопления данных станциями для варианта №5

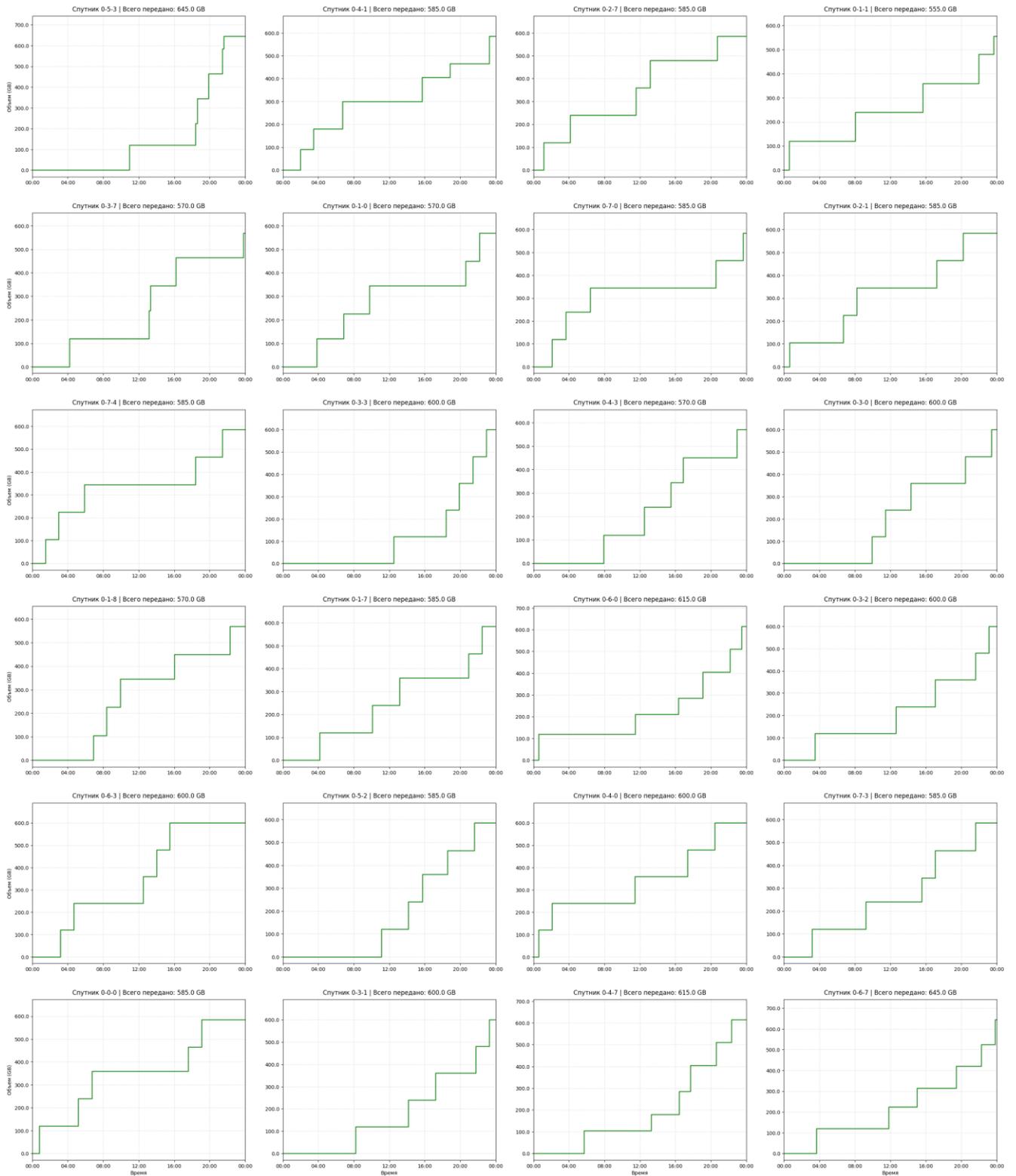


Рисунок А.15 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №5

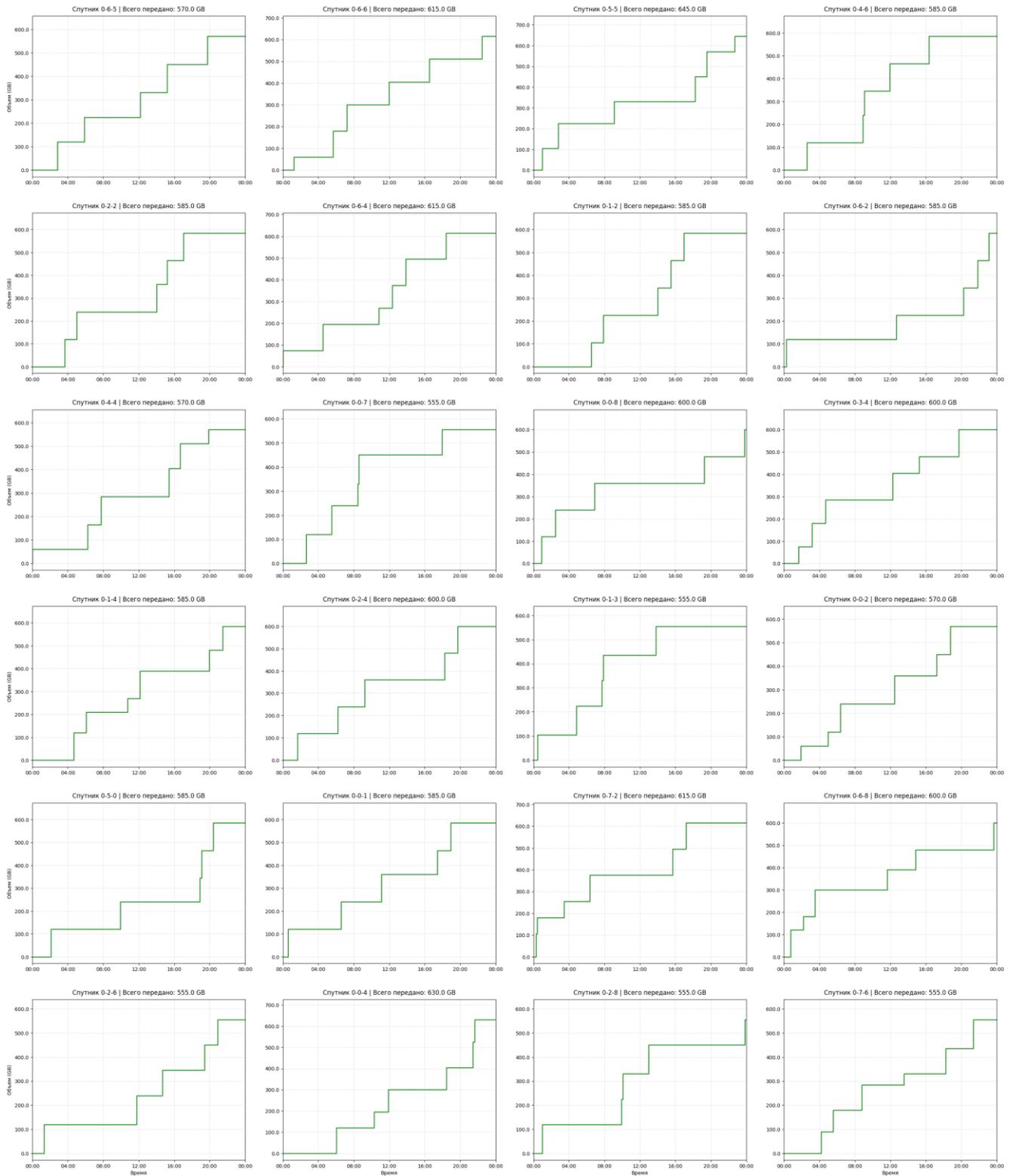


Рисунок А.16 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №5



Рисунок А.17 – Результаты моделирования передачи данных КА на НППИ для варианта №5

Приложение Б

Результаты моделирования вариантов орбитального построения
радиолокационных космических систем

Обозначение в формате $i: N, P, F$	Высота, км	Наклонение, °	Общее кол-во КА	Кол-во КА в одной плоскости	Кол-во плоскостей	Средняя периодичность наблюдения, с	Суммарная площадь наблюдения, км ²	Процент покрытия акватории СМП, %
79.0: 1,1,0	600	79	1	1	1	80788.25	610003.7	18.79889
79.0: 2,1,0	600	79	2	2	1	76803.44	1052694	31.41023
79.0: 3,1,0	600	79	3	3	1	73215.53	1394712	41.62427
79.0: 4,1,0	600	79	4	4	1	70089.38	1750518	49.87062
79.0: 5,1,0	600	79	5	5	1	66584.66	1983621	59.307
79.0: 6,1,0	600	79	6	6	1	64150.55	2229531	65.27303
79.0: 7,1,0	600	79	7	7	1	61922.12	2418434	70.26855
79.0: 8,1,0	600	79	8	8	1	59828.96	2576959	72.18636
79.0: 9,1,0	600	79	9	9	1	57578.82	2677962	76.77697
79.0: 10,1,0	600	79	10	10	1	56135.73	2727953	78.05404
79.0: 2,2,0	600	79	2	1	2	79020.24	1053816	31.16197
79.0: 4,2,0	600	79	4	2	2	73316.05	1570233	50.13336
79.0: 6,2,0	600	79	6	3	2	68462.73	2209955	58.15218
79.0: 8,2,0	600	79	8	4	2	64374.22	2413370	73.33659
79.0: 10,2,0	600	79	10	5	2	59148.88	2514289	63.4822
79.0: 12,2,0	600	79	12	6	2	56786.56	2827334	80.10347
79.0: 14,2,0	600	79	14	7	2	53646.91	2579594	80.82754
79.0: 16,2,0	600	79	16	8	2	49905.9	2930773	78.37067
79.0: 18,2,0	600	79	18	9	2	48187.06	2703700	83.7905
79.0: 20,2,0	600	79	20	10	2	45149.29	2936343	81.4961
79.0: 3,3,0	600	79	3	1	3	75744.39	1060274	38.71715
79.0: 6,3,0	600	79	6	2	3	68494.33	1731208	60.45625
79.0: 9,3,0	600	79	9	3	3	62552.35	2204779	74.72342
79.0: 12,3,0	600	79	12	4	3	57117.46	2564740	81.3485
79.0: 15,3,0	600	79	15	5	3	52828.76	2789297	83.61955
79.0: 18,3,0	600	79	18	6	3	48971.14	2897231	83.31026
79.0: 21,3,0	600	79	21	7	3	45694.87	2933644	83.39226
79.0: 24,3,0	600	79	24	8	3	42975.65	2936343	83.933
79.0: 27,3,0	600	79	27	9	3	41665.53	2936343	83.933
79.0: 30,3,0	600	79	30	10	3	39351.64	2936343	83.933
79.0: 4,4,0	600	79	4	1	4	73019.58	1780635	49.38445
79.0: 8,4,0	600	79	8	2	4	63627.55	2424964	73.29478
79.0: 12,4,0	600	79	12	3	4	60895.87	2713574	64.86468
79.0: 16,4,0	600	79	16	4	4	52412.88	2635840	83.21767
79.0: 20,4,0	600	79	20	5	4	45794.96	2925289	81.6361
79.0: 24,4,0	600	79	24	6	4	45225.19	2934779	83.63181
79.0: 28,4,0	600	79	28	7	4	41669.11	2650772	83.43187
79.0: 32,4,0	600	79	32	8	4	37899.04	2936343	83.933

79.0: 36,4,0	600	79	36	9	4	37624.61	2934779	83.933
79.0: 40,4,0	600	79	40	10	4	35378.3	2936343	82.74664
79.0: 5,5,0	600	79	5	1	5	72898.42	1144896	44.33122
79.0: 10,5,0	600	79	10	2	5	63681.87	1848289	67.84977
79.0: 15,5,0	600	79	15	3	5	56532	2351551	79.73803
79.0: 20,5,0	600	79	20	4	5	49988.67	2663631	83.88753
79.0: 25,5,0	600	79	25	5	5	45818.66	2860164	83.933
79.0: 30,5,0	600	79	30	6	5	40566.89	2932359	83.933
79.0: 35,5,0	600	79	35	7	5	37630.38	2936343	83.933
79.0: 40,5,0	600	79	40	8	5	34953.99	2936343	83.933
79.0: 45,5,0	600	79	45	9	5	33315.82	2936343	83.933
79.0: 50,5,0	600	79	50	10	5	31736.68	2936343	83.933
79.0: 6,6,0	600	79	6	1	6	68323.13	1763374	60.40866
79.0: 12,6,0	600	79	12	2	6	62599.13	1874495	68.07476
79.0: 18,6,0	600	79	18	3	6	48666.46	2890394	83.75049
79.0: 24,6,0	600	79	24	4	6	48406.6	2684737	83.89163
79.0: 30,6,0	600	79	30	5	6	38669.26	2936343	83.84277
79.0: 36,6,0	600	79	36	6	6	38687.27	2933730	83.933
79.0: 42,6,0	600	79	42	7	6	36159.56	2936343	83.933
79.0: 48,6,0	600	79	48	8	6	33077.33	2936343	83.933
79.0: 54,6,0	600	79	54	9	6	33237.47	2936343	83.933
79.0: 60,6,0	600	79	60	10	6	29618.89	2936343	83.933
79.0: 7,7,0	600	79	7	1	7	66825.93	2414005	70.13973
79.0: 14,7,0	600	79	14	2	7	54616.61	2633643	82.58059
79.0: 21,7,0	600	79	21	3	7	43972.71	2924051	76.85833
79.0: 28,7,0	600	79	28	4	7	41567.91	2657127	83.933
79.0: 35,7,0	600	79	35	5	7	37444.75	2936343	83.933
79.0: 42,7,0	600	79	42	6	7	33188.78	2936343	83.7905
79.0: 49,7,0	600	79	49	7	7	34423.21	2936343	83.933
79.0: 56,7,0	600	79	56	8	7	34290.02	2666089	83.933
79.0: 63,7,0	600	79	63	9	7	30400.14	2936343	76.89623
79.0: 70,7,0	600	79	70	10	7	29974.61	2936343	83.933
79.0: 8,8,0	600	79	8	1	8	63969.33	2456356	73.03969
79.0: 16,8,0	600	79	16	2	8	50924.13	2914607	83.07859
79.0: 24,8,0	600	79	24	3	8	44960.21	2936343	83.6001
79.0: 32,8,0	600	79	32	4	8	37882.41	2936343	83.933
79.0: 40,8,0	600	79	40	5	8	36306.55	2936343	83.933
79.0: 48,8,0	600	79	48	6	8	39164.4	2936343	83.88889
79.0: 56,8,0	600	79	56	7	8	35270.16	2690440	83.63111
79.0: 64,8,0	600	79	64	8	8	30307.13	2936343	83.933
79.0: 72,8,0	600	79	72	9	8	27707.35	2936343	83.933
79.0: 80,8,0	600	79	80	10	8	26111.86	2936343	83.933
79.0: 9,9,0	600	79	9	1	9	62202.22	2268821	74.97746
79.0: 18,9,0	600	79	18	2	9	48825.76	2901080	83.3936
79.0: 27,9,0	600	79	27	3	9	52652.11	2422647	81.67741
79.0: 36,9,0	600	79	36	4	9	36775.51	2936343	83.933
79.0: 45,9,0	600	79	45	5	9	35166.12	2936343	83.933
79.0: 54,9,0	600	79	54	6	9	35377.03	2936343	83.933

79.0: 63,9,0	600	79	63	7	9	26984.56	2936343	83.61614
79.0: 72,9,0	600	79	72	8	9	30474.9	2936343	83.933
79.0: 81,9,0	600	79	81	9	9	27391.17	2936343	83.933
79.0: 90,9,0	600	79	90	10	9	25654.44	2936343	83.933
79.0: 10,10,0	600	79	10	1	10	63654.07	1861482	67.37723
79.0: 20,10,0	600	79	20	2	10	60197.71	1929806	70.48428
79.0: 30,10,0	600	79	30	3	10	40754.02	2930966	83.933
79.0: 40,10,0	600	79	40	4	10	44976.22	2724502	83.933
79.0: 50,10,0	600	79	50	5	10	31129.79	2936343	83.933
79.0: 60,10,0	600	79	60	6	10	34652.67	2936343	83.933
79.0: 70,10,0	600	79	70	7	10	27689.41	2936343	83.933
79.0: 80,10,0	600	79	80	8	10	28528.14	2936343	83.933
79.0: 90,10,0	600	79	90	9	10	25695.01	2936343	83.933
79.0: 100,10,0	600	79	100	10	10	24951.46	2936343	83.933
90.0: 1,1,0	600	90	1	1	1	83430.58	477841	15.13331
90.0: 2,1,0	600	90	2	2	1	80445.21	883077.9	27.96723
90.0: 3,1,0	600	90	3	3	1	77427.34	836154.7	26.48117
90.0: 4,1,0	600	90	4	4	1	74281.73	1760177	55.74511
90.0: 5,1,0	600	90	5	5	1	71412.6	1919512	60.79127
90.0: 6,1,0	600	90	6	6	1	68475.92	1611056	51.02242
90.0: 7,1,0	600	90	7	7	1	65241.47	2411096	76.35984
90.0: 8,1,0	600	90	8	8	1	62622.67	2631249	83.33212
90.0: 9,1,0	600	90	9	9	1	60146.54	2316438	73.362
90.0: 10,1,0	600	90	10	10	1	56931.24	2738842	86.73962
90.0: 2,2,0	600	90	2	1	2	80963.22	856870	27.13723
90.0: 4,2,0	600	90	4	2	2	75552.54	1283832	40.65919
90.0: 6,2,0	600	90	6	3	2	69811.34	1967043	62.2966
90.0: 8,2,0	600	90	8	4	2	64460.51	2553347	80.86496
90.0: 10,2,0	600	90	10	5	2	59051.97	2413954	76.45034
90.0: 12,2,0	600	90	12	6	2	53335.47	2839765	89.93586
90.0: 14,2,0	600	90	14	7	2	50856.37	2781742	88.09827
90.0: 16,2,0	600	90	16	8	2	51555.6	3045330	96.44614
90.0: 18,2,0	600	90	18	9	2	52178.53	2987256	94.60692
90.0: 20,2,0	600	90	20	10	2	52038.4	2831215	89.66508
90.0: 3,3,0	600	90	3	1	3	77705.26	1164304	36.87372
90.0: 6,3,0	600	90	6	2	3	71159.44	1631939	51.6838
90.0: 9,3,0	600	90	9	3	3	61671.98	2514045	79.62026
90.0: 12,3,0	600	90	12	4	3	55849.63	2997523	94.93209
90.0: 15,3,0	600	90	15	5	3	56888.34	3071548	97.27646
90.0: 18,3,0	600	90	18	6	3	43121.5	3157545	100
90.0: 21,3,0	600	90	21	7	3	45894.64	3151631	99.8127
90.0: 24,3,0	600	90	24	8	3	39550.69	3157545	100
90.0: 27,3,0	600	90	27	9	3	35578.06	3157545	100
90.0: 30,3,0	600	90	30	10	3	32294.61	3157545	100
90.0: 4,4,0	600	90	4	1	4	75472.43	1540106	48.77542
90.0: 8,4,0	600	90	8	2	4	64691.08	2370402	75.07103
90.0: 12,4,0	600	90	12	3	4	58943.35	2652690	84.01116
90.0: 16,4,0	600	90	16	4	4	50465.11	3157545	100

90.0: 20,4,0	600	90	20	5	4	43212.46	2878783	91.17158
90.0: 24,4,0	600	90	24	6	4	34845.27	3157545	100
90.0: 28,4,0	600	90	28	7	4	33204.19	2862991	90.67144
90.0: 32,4,0	600	90	32	8	4	33034.25	3157545	100
90.0: 36,4,0	600	90	36	9	4	33298.91	3157545	100
90.0: 40,4,0	600	90	40	10	4	35119	2963331	93.84921
90.0: 5,5,0	600	90	5	1	5	74874.1	1335191	42.28575
90.0: 10,5,0	600	90	10	2	5	67037.22	1854505	58.73251
90.0: 15,5,0	600	90	15	3	5	54186.88	2724876	86.2973
90.0: 20,5,0	600	90	20	4	5	47489.23	3157545	100
90.0: 25,5,0	600	90	25	5	5	51622.66	3137063	99.35135
90.0: 30,5,0	600	90	30	6	5	30850.91	3157545	100
90.0: 35,5,0	600	90	35	7	5	39492.58	3157545	100
90.0: 40,5,0	600	90	40	8	5	28912.87	3157545	100
90.0: 45,5,0	600	90	45	9	5	23696.75	3157545	100
90.0: 50,5,0	600	90	50	10	5	24674.34	3157545	100
90.0: 6,6,0	600	90	6	1	6	71430.88	1657593	52.49627
90.0: 12,6,0	600	90	12	2	6	66129.89	1874887	59.378
90.0: 18,6,0	600	90	18	3	6	43819.93	3139476	99.42776
90.0: 24,6,0	600	90	24	4	6	45574.59	3157545	100
90.0: 30,6,0	600	90	30	5	6	33798.62	3157545	100
90.0: 36,6,0	600	90	36	6	6	28343.13	3157545	100
90.0: 42,6,0	600	90	42	7	6	23369.06	3157545	100
90.0: 48,6,0	600	90	48	8	6	26515.65	3157545	100
90.0: 54,6,0	600	90	54	9	6	26581.45	3157545	100
90.0: 60,6,0	600	90	60	10	6	25600.72	3157545	100
90.0: 7,7,0	600	90	7	1	7	71626.43	2137768	67.70348
90.0: 14,7,0	600	90	14	2	7	56291.06	2746171	86.97171
90.0: 21,7,0	600	90	21	3	7	43010.76	3150072	99.76333
90.0: 28,7,0	600	90	28	4	7	39654.67	3043445	96.38643
90.0: 35,7,0	600	90	35	5	7	28709.95	3157545	100
90.0: 42,7,0	600	90	42	6	7	31755.93	3157545	100
90.0: 49,7,0	600	90	49	7	7	36308.33	3157545	100
90.0: 56,7,0	600	90	56	8	7	31127.34	3123790	98.931
90.0: 63,7,0	600	90	63	9	7	22370.84	3157545	100
90.0: 70,7,0	600	90	70	10	7	15851.78	3157545	100
90.0: 8,8,0	600	90	8	1	8	65245.17	2686803	85.09151
90.0: 16,8,0	600	90	16	2	8	45810.11	3133336	99.23329
90.0: 24,8,0	600	90	24	3	8	34904.41	3157545	100
90.0: 32,8,0	600	90	32	4	8	32846.19	3157545	100
90.0: 40,8,0	600	90	40	5	8	22579.36	3157545	100
90.0: 48,8,0	600	90	48	6	8	25240.95	3157545	100
90.0: 56,8,0	600	90	56	7	8	24338.63	2898547	91.79749
90.0: 64,8,0	600	90	64	8	8	22962.27	3157545	100
90.0: 72,8,0	600	90	72	9	8	19028.15	3157545	100
90.0: 80,8,0	600	90	80	10	8	17066.7	3157545	100
90.0: 9,9,0	600	90	9	1	9	61703.53	2479467	78.52515
90.0: 18,9,0	600	90	18	2	9	43465.59	3116569	98.70228

90.0: 27,9,0	600	90	27	3	9	50460.85	2860965	90.60725
90.0: 36,9,0	600	90	36	4	9	31920.35	3157545	100
90.0: 45,9,0	600	90	45	5	9	22311.75	3157545	100
90.0: 54,9,0	600	90	54	6	9	24072.39	3157545	100
90.0: 63,9,0	600	90	63	7	9	19345.74	3157545	100
90.0: 72,9,0	600	90	72	8	9	23115.59	3157545	100
90.0: 81,9,0	600	90	81	9	9	16760.06	3157545	100
90.0: 90,9,0	600	90	90	10	9	12618.84	3157545	100
90.0: 10,10,0	600	90	10	1	10	66757.28	1823188	57.74068
90.0: 20,10,0	600	90	20	2	10	64126.58	1923868	60.92923
90.0: 30,10,0	600	90	30	3	10	30812.42	3157545	100
90.0: 40,10,0	600	90	40	4	10	41655.77	3157545	100
90.0: 50,10,0	600	90	50	5	10	26139.89	3157545	100
90.0: 60,10,0	600	90	60	6	10	22825.98	3157545	100
90.0: 70,10,0	600	90	70	7	10	14521.05	3157545	100
90.0: 80,10,0	600	90	80	8	10	20956.15	3157545	100
90.0: 90,10,0	600	90	90	9	10	15158.74	3157545	100
90.0: 100,10,0	600	90	100	10	10	19293.1	3157545	100
97.8: 1,1,0	600	97.8	1	1	1	83764.58	540199.6	17.10822
97.8: 2,1,0	600	97.8	2	2	1	81540.9	975609.7	30.89773
97.8: 3,1,0	600	97.8	3	3	1	79021.84	1360893	43.09973
97.8: 4,1,0	600	97.8	4	4	1	77062.48	1699711	53.83014
97.8: 5,1,0	600	97.8	5	5	1	74982.6	1977693	62.63389
97.8: 6,1,0	600	97.8	6	6	1	72786.07	2231115	70.6598
97.8: 7,1,0	600	97.8	7	7	1	70921.52	2470910	78.25415
97.8: 8,1,0	600	97.8	8	8	1	69096.81	2608216	82.60267
97.8: 9,1,0	600	97.8	9	9	1	67565.92	2694909	85.34826
97.8: 10,1,0	600	97.8	10	10	1	65916.26	2824251	89.44452
97.8: 2,2,0	600	97.8	2	1	2	79066.54	973390.2	30.82744
97.8: 4,2,0	600	97.8	4	2	2	72645.01	1539289	48.74956
97.8: 6,2,0	600	97.8	6	3	2	66848.86	2191077	69.39179
97.8: 8,2,0	600	97.8	8	4	2	61805.12	2497292	79.08967
97.8: 10,2,0	600	97.8	10	5	2	56940.15	2530562	80.14336
97.8: 12,2,0	600	97.8	12	6	2	53086.24	2948513	93.37994
97.8: 14,2,0	600	97.8	14	7	2	47992.9	2608246	82.60361
97.8: 16,2,0	600	97.8	16	8	2	45650.43	3074660	97.37502
97.8: 18,2,0	600	97.8	18	9	2	42320.36	2772204	87.7962
97.8: 20,2,0	600	97.8	20	10	2	39999.16	3080360	97.55554
97.8: 3,3,0	600	97.8	3	1	3	76181.18	987960.2	31.28888
97.8: 6,3,0	600	97.8	6	2	3	68288.6	1704176	53.97157
97.8: 9,3,0	600	97.8	9	3	3	60679.27	2299272	72.81835
97.8: 12,3,0	600	97.8	12	4	3	54800.42	2671283	84.6
97.8: 15,3,0	600	97.8	15	5	3	49502.35	2933438	92.90249
97.8: 18,3,0	600	97.8	18	6	3	44985.58	3065800	97.09442
97.8: 21,3,0	600	97.8	21	7	3	41605.61	3085886	97.73056
97.8: 24,3,0	600	97.8	24	8	3	38002	3085886	97.73056
97.8: 27,3,0	600	97.8	27	9	3	35215.97	3085886	97.73056
97.8: 30,3,0	600	97.8	30	10	3	33226.74	3085886	97.73056

97.8: 4,4,0	600	97.8	4	1	4	72508.66	1715192	54.32045
97.8: 8,4,0	600	97.8	8	2	4	62076.36	2471261	78.26527
97.8: 12,4,0	600	97.8	12	3	4	55637.26	2819501	89.2941
97.8: 16,4,0	600	97.8	16	4	4	51063.2	2760725	87.43264
97.8: 20,4,0	600	97.8	20	5	4	41426.06	3071004	97.25925
97.8: 24,4,0	600	97.8	24	6	4	38162.04	3085886	97.73056
97.8: 28,4,0	600	97.8	28	7	4	35141.76	2664061	84.37128
97.8: 32,4,0	600	97.8	32	8	4	33761.54	3085886	97.73056
97.8: 36,4,0	600	97.8	36	9	4	28546.75	3085886	97.73056
97.8: 40,4,0	600	97.8	40	10	4	28230.36	3085886	97.73056
97.8: 5,5,0	600	97.8	5	1	5	73919.97	1093043	34.61688
97.8: 10,5,0	600	97.8	10	2	5	64555.41	1850293	58.5991
97.8: 15,5,0	600	97.8	15	3	5	55523.57	2435703	77.13915
97.8: 20,5,0	600	97.8	20	4	5	48690.57	2804023	88.80389
97.8: 25,5,0	600	97.8	25	5	5	42332.03	3024775	95.79514
97.8: 30,5,0	600	97.8	30	6	5	37890.4	3080728	97.56721
97.8: 35,5,0	600	97.8	35	7	5	33592.86	3085886	97.73056
97.8: 40,5,0	600	97.8	40	8	5	30098.1	3085886	97.73056
97.8: 45,5,0	600	97.8	45	9	5	26433.75	3085886	97.73056
97.8: 50,5,0	600	97.8	50	10	5	23541.92	3085886	97.73056
97.8: 6,6,0	600	97.8	6	1	6	68391.61	1691885	53.58229
97.8: 12,6,0	600	97.8	12	2	6	63595.81	1870494	59.23888
97.8: 18,6,0	600	97.8	18	3	6	45462.89	3046041	96.46864
97.8: 24,6,0	600	97.8	24	4	6	47104.31	2830354	89.63782
97.8: 30,6,0	600	97.8	30	5	6	33116.87	3085886	97.73056
97.8: 36,6,0	600	97.8	36	6	6	35745.45	3085886	97.73056
97.8: 42,6,0	600	97.8	42	7	6	26223.2	3085886	97.73056
97.8: 48,6,0	600	97.8	48	8	6	27485.92	3085886	97.73056
97.8: 54,6,0	600	97.8	54	9	6	21682.2	3085886	97.73056
97.8: 60,6,0	600	97.8	60	10	6	21179.22	3085886	97.73056
97.8: 7,7,0	600	97.8	7	1	7	65695.3	2450035	77.59305
97.8: 14,7,0	600	97.8	14	2	7	49847.06	2610411	82.67219
97.8: 21,7,0	600	97.8	21	3	7	40451.85	3082230	97.61476
97.8: 28,7,0	600	97.8	28	4	7	33069.2	2610411	82.67219
97.8: 35,7,0	600	97.8	35	5	7	29102.84	3085886	97.73056
97.8: 42,7,0	600	97.8	42	6	7	27028.35	3085886	97.73056
97.8: 49,7,0	600	97.8	49	7	7	29798.8	3085886	97.73056
97.8: 56,7,0	600	97.8	56	8	7	24837.43	2612870	82.75005
97.8: 63,7,0	600	97.8	63	9	7	22818.94	3085886	97.73056
97.8: 70,7,0	600	97.8	70	10	7	18472.99	3085886	97.73056
97.8: 8,8,0	600	97.8	8	1	8	62392.04	2508587	79.4474
97.8: 16,8,0	600	97.8	16	2	8	46881.34	3051379	96.63771
97.8: 24,8,0	600	97.8	24	3	8	38620.79	3085886	97.73056
97.8: 32,8,0	600	97.8	32	4	8	33272.98	3085886	97.73056
97.8: 40,8,0	600	97.8	40	5	8	27048.36	3085886	97.73056
97.8: 48,8,0	600	97.8	48	6	8	29826.66	3085886	97.73056
97.8: 56,8,0	600	97.8	56	7	8	27635.39	2695442	85.36512
97.8: 64,8,0	600	97.8	64	8	8	25168.56	3085886	97.73056

97.8: 72,8,0	600	97.8	72	9	8	18540.62	3085886	97.73056
97.8: 80,8,0	600	97.8	80	10	8	16242.63	3085886	97.73056
97.8: 9,9,0	600	97.8	9	1	9	61107.86	2281438	72.25353
97.8: 18,9,0	600	97.8	18	2	9	45460.23	3051527	96.64241
97.8: 27,9,0	600	97.8	27	3	9	51955.91	2506688	79.38725
97.8: 36,9,0	600	97.8	36	4	9	28584.09	3085886	97.73056
97.8: 45,9,0	600	97.8	45	5	9	25310.53	3085886	97.73056
97.8: 54,9,0	600	97.8	54	6	9	32351.46	3085886	97.73056
97.8: 63,9,0	600	97.8	63	7	9	19289.32	3085886	97.73056
97.8: 72,9,0	600	97.8	72	8	9	19942.05	3085886	97.73056
97.8: 81,9,0	600	97.8	81	9	9	20122.82	3085886	97.73056
97.8: 90,9,0	600	97.8	90	10	9	14132.27	3085886	97.73056
97.8: 10,10,0	600	97.8	10	1	10	64495.92	1849737	58.58149
97.8: 20,10,0	600	97.8	20	2	10	61577.75	1944720	61.58962
97.8: 30,10,0	600	97.8	30	3	10	37635.16	3082472	97.62244
97.8: 40,10,0	600	97.8	40	4	10	43773.35	2880495	91.2258
97.8: 50,10,0	600	97.8	50	5	10	23357.28	3085886	97.73056
97.8: 60,10,0	600	97.8	60	6	10	31581.71	3085886	97.73056
97.8: 70,10,0	600	97.8	70	7	10	17245.57	3085886	97.73056
97.8: 80,10,0	600	97.8	80	8	10	23101.62	3085886	97.73056
97.8: 90,10,0	600	97.8	90	9	10	14859.93	3085886	97.73056
97.8: 100,10,0	600	97.8	100	10	10	16104.72	3085886	97.73056
99.0: 1,1,0	600	99	1	1	1	83757.69	604671.8	19.15006
99.0: 2,1,0	600	99	2	2	1	81742.82	1016074	32.17926
99.0: 3,1,0	600	99	3	3	1	79702.25	1392120	44.08869
99.0: 4,1,0	600	99	4	4	1	77827.77	1699197	53.81386
99.0: 5,1,0	600	99	5	5	1	75752.92	1994030	63.15128
99.0: 6,1,0	600	99	6	6	1	73912.92	2192924	69.45029
99.0: 7,1,0	600	99	7	7	1	72137.12	2430285	76.96756
99.0: 8,1,0	600	99	8	8	1	70678.58	2563664	81.19169
99.0: 9,1,0	600	99	9	9	1	68964.62	2676844	84.77614
99.0: 10,1,0	600	99	10	10	1	67720.69	2756933	87.31255
99.0: 2,2,0	600	99	2	1	2	78803.77	1055921	33.44121
99.0: 4,2,0	600	99	4	2	2	72075.05	1550177	49.09437
99.0: 6,2,0	600	99	6	3	2	67055.81	2210136	69.99541
99.0: 8,2,0	600	99	8	4	2	62046.45	2414773	76.47628
99.0: 10,2,0	600	99	10	5	2	57534.86	2528861	80.08949
99.0: 12,2,0	600	99	12	6	2	53541.07	2845274	90.11034
99.0: 14,2,0	600	99	14	7	2	48897.68	2579754	81.70126
99.0: 16,2,0	600	99	16	8	2	46586.49	2960920	93.77285
99.0: 18,2,0	600	99	18	9	2	42552.66	2730564	86.47743
99.0: 20,2,0	600	99	20	10	2	41309.27	2968076	93.99948
99.0: 3,3,0	600	99	3	1	3	75341.37	1066880	33.78827
99.0: 6,3,0	600	99	6	2	3	67559.38	1734375	54.92795
99.0: 9,3,0	600	99	9	3	3	60535.88	2236042	70.81583
99.0: 12,3,0	600	99	12	4	3	55357.3	2594943	82.18229
99.0: 15,3,0	600	99	15	5	3	49998.72	2837185	89.85415
99.0: 18,3,0	600	99	18	6	3	45443.42	2929002	92.762

99.0: 21,3,0	600	99	21	7	3	42120.18	2968312	94.00698
99.0: 24,3,0	600	99	24	8	3	39083.91	2969597	94.04766
99.0: 27,3,0	600	99	27	9	3	36576.82	2969597	94.04766
99.0: 30,3,0	600	99	30	10	3	34608.21	2969597	94.04766
99.0: 4,4,0	600	99	4	1	4	72456.05	1757484	55.65983
99.0: 8,4,0	600	99	8	2	4	62138.53	2404378	76.14708
99.0: 12,4,0	600	99	12	3	4	56406.31	2719392	86.12361
99.0: 16,4,0	600	99	16	4	4	51649.51	2664554	84.38689
99.0: 20,4,0	600	99	20	5	4	42535.66	2961914	93.80435
99.0: 24,4,0	600	99	24	6	4	39842.35	2968097	94.00016
99.0: 28,4,0	600	99	28	7	4	37138.22	2661875	84.30205
99.0: 32,4,0	600	99	32	8	4	34769.47	2969597	94.04766
99.0: 36,4,0	600	99	36	9	4	30223.76	2969597	94.04766
99.0: 40,4,0	600	99	40	10	4	30148.43	2969597	94.04766
99.0: 5,5,0	600	99	5	1	5	73079.83	1153864	36.54307
99.0: 10,5,0	600	99	10	2	5	63733.59	1868886	59.18794
99.0: 15,5,0	600	99	15	3	5	55627.37	2363556	74.85423
99.0: 20,5,0	600	99	20	4	5	49739.7	2690215	85.19959
99.0: 25,5,0	600	99	25	5	5	43569.51	2909880	92.15641
99.0: 30,5,0	600	99	30	6	5	38326.37	2963525	93.85536
99.0: 35,5,0	600	99	35	7	5	35315.24	2969597	94.04766
99.0: 40,5,0	600	99	40	8	5	31840.61	2969597	94.04766
99.0: 45,5,0	600	99	45	9	5	29044.16	2969597	94.04766
99.0: 50,5,0	600	99	50	10	5	26346.24	2969597	94.04766
99.0: 6,6,0	600	99	6	1	6	67351.74	1761804	55.79666
99.0: 12,6,0	600	99	12	2	6	62746.92	1888248	59.80114
99.0: 18,6,0	600	99	18	3	6	45597.19	2933397	92.90121
99.0: 24,6,0	600	99	24	4	6	48135.1	2726733	86.35611
99.0: 30,6,0	600	99	30	5	6	33774.38	2969597	94.04766
99.0: 36,6,0	600	99	36	6	6	36442.11	2964419	93.88368
99.0: 42,6,0	600	99	42	7	6	28105.81	2969597	94.04766
99.0: 48,6,0	600	99	48	8	6	29428.09	2969597	94.04766
99.0: 54,6,0	600	99	54	9	6	23932.68	2969597	94.04766
99.0: 60,6,0	600	99	60	10	6	23729.39	2969597	94.04766
99.0: 7,7,0	600	99	7	1	7	65718.23	2368961	75.02541
99.0: 14,7,0	600	99	14	2	7	50371.72	2595279	82.19295
99.0: 21,7,0	600	99	21	3	7	41742.85	2963484	93.85405
99.0: 28,7,0	600	99	28	4	7	34712.08	2626163	83.17105
99.0: 35,7,0	600	99	35	5	7	31073.04	2969597	94.04766
99.0: 42,7,0	600	99	42	6	7	29529.52	2969597	94.04766
99.0: 49,7,0	600	99	49	7	7	31395.51	2969597	94.04766
99.0: 56,7,0	600	99	56	8	7	27084.4	2641584	83.65943
99.0: 63,7,0	600	99	63	9	7	24609.4	2969597	94.04766
99.0: 70,7,0	600	99	70	10	7	21114.36	2969597	94.04766
99.0: 8,8,0	600	99	8	1	8	62817.92	2496837	79.07525
99.0: 16,8,0	600	99	16	2	8	47775.02	2955760	93.60944
99.0: 24,8,0	600	99	24	3	8	40161.12	2969597	94.04766
99.0: 32,8,0	600	99	32	4	8	34126.5	2969597	94.04766

99.0: 40,8,0	600	99	40	5	8	28883.45	2969597	94.04766
99.0: 48,8,0	600	99	48	6	8	32093.25	2969597	94.04766
99.0: 56,8,0	600	99	56	7	8	29886.93	2691049	85.22601
99.0: 64,8,0	600	99	64	8	8	26576.33	2969597	94.04766
99.0: 72,8,0	600	99	72	9	8	20730.62	2969597	94.04766
99.0: 80,8,0	600	99	80	10	8	18941.78	2969597	94.04766
99.0: 9,9,0	600	99	9	1	9	60487.91	2252551	71.33869
99.0: 18,9,0	600	99	18	2	9	45620.89	2945232	93.27601
99.0: 27,9,0	600	99	27	3	9	52004.98	2442387	77.35082
99.0: 36,9,0	600	99	36	4	9	30973.64	2969597	94.04766
99.0: 45,9,0	600	99	45	5	9	27213.82	2969597	94.04766
99.0: 54,9,0	600	99	54	6	9	33051.71	2969597	94.04766
99.0: 63,9,0	600	99	63	7	9	21621.38	2969597	94.04766
99.0: 72,9,0	600	99	72	8	9	22427.89	2969597	94.04766
99.0: 81,9,0	600	99	81	9	9	22966.8	2969597	94.04766
99.0: 90,9,0	600	99	90	10	9	18106.56	2969597	94.04766
99.0: 10,10,0	600	99	10	1	10	63600.17	1872303	59.29617
99.0: 20,10,0	600	99	20	2	10	60655.52	1956002	61.94694
99.0: 30,10,0	600	99	30	3	10	38279.71	2959674	93.73339
99.0: 40,10,0	600	99	40	4	10	45033.87	2762981	87.50408
99.0: 50,10,0	600	99	50	5	10	26149.55	2969597	94.04766
99.0: 60,10,0	600	99	60	6	10	32369.77	2969597	94.04766
99.0: 70,10,0	600	99	70	7	10	20379.58	2969597	94.04766
99.0: 80,10,0	600	99	80	8	10	25128.23	2969597	94.04766
99.0: 90,10,0	600	99	90	9	10	17607.01	2969597	94.04766
99.0: 100,10,0	600	99	100	10	10	19289.3	2969597	94.04766
99.5: 1,1,0	600	99.5	1	1	1	83885.99	610003.7	19.31892
99.5: 2,1,0	600	99.5	2	2	1	81818.86	1052694	33.33901
99.5: 3,1,0	600	99.5	3	3	1	79952.49	1394712	44.17077
99.5: 4,1,0	600	99.5	4	4	1	77954.95	1750518	55.4392
99.5: 5,1,0	600	99.5	5	5	1	76244.07	1983621	62.82163
99.5: 6,1,0	600	99.5	6	6	1	74303.89	2229531	70.60965
99.5: 7,1,0	600	99.5	7	7	1	72625.18	2418434	76.59224
99.5: 8,1,0	600	99.5	8	8	1	71088.35	2576959	81.61274
99.5: 9,1,0	600	99.5	9	9	1	69780.57	2677962	84.81153
99.5: 10,1,0	600	99.5	10	10	1	68476.22	2727953	86.39476
99.5: 2,2,0	600	99.5	2	1	2	78747.94	1053816	33.37455
99.5: 4,2,0	600	99.5	4	2	2	71986.86	1570233	49.72954
99.5: 6,2,0	600	99.5	6	3	2	67103.71	2209955	69.98966
99.5: 8,2,0	600	99.5	8	4	2	61784.7	2413370	76.43186
99.5: 10,2,0	600	99.5	10	5	2	57512.1	2514289	79.62798
99.5: 12,2,0	600	99.5	12	6	2	53642.12	2827334	89.54218
99.5: 14,2,0	600	99.5	14	7	2	49331.71	2579594	81.69621
99.5: 16,2,0	600	99.5	16	8	2	47105.71	2930773	92.81809
99.5: 18,2,0	600	99.5	18	9	2	42960.17	2703700	85.62664
99.5: 20,2,0	600	99.5	20	10	2	41498.06	2936343	92.99449
99.5: 3,3,0	600	99.5	3	1	3	75305.75	1060274	33.57906
99.5: 6,3,0	600	99.5	6	2	3	67326.04	1731208	54.82767

99.5: 9,3,0	600	99.5	9	3	3	60985.92	2204779	69.82573
99.5: 12,3,0	600	99.5	12	4	3	54622.97	2564740	81.22577
99.5: 15,3,0	600	99.5	15	5	3	49487.34	2789297	88.33752
99.5: 18,3,0	600	99.5	18	6	3	45444.37	2897231	91.75581
99.5: 21,3,0	600	99.5	21	7	3	41856.03	2933644	92.90902
99.5: 24,3,0	600	99.5	24	8	3	39436.2	2936343	92.99449
99.5: 27,3,0	600	99.5	27	9	3	36808.96	2936343	92.99449
99.5: 30,3,0	600	99.5	30	10	3	34710.99	2936343	92.99449
99.5: 4,4,0	600	99.5	4	1	4	72455.85	1780635	56.39304
99.5: 8,4,0	600	99.5	8	2	4	61327.65	2424964	76.79904
99.5: 12,4,0	600	99.5	12	3	4	56477.33	2713574	85.93938
99.5: 16,4,0	600	99.5	16	4	4	50861.57	2635840	83.47752
99.5: 20,4,0	600	99.5	20	5	4	42345.01	2925289	92.64443
99.5: 24,4,0	600	99.5	24	6	4	39583.45	2934779	92.94497
99.5: 28,4,0	600	99.5	28	7	4	37886.29	2650772	83.95041
99.5: 32,4,0	600	99.5	32	8	4	35356.28	2936343	92.99449
99.5: 36,4,0	600	99.5	36	9	4	30656.88	2934779	92.94497
99.5: 40,4,0	600	99.5	40	10	4	30214.48	2936343	92.99449
99.5: 5,5,0	600	99.5	5	1	5	73077.09	1144896	36.25905
99.5: 10,5,0	600	99.5	10	2	5	63563.34	1848289	58.53565
99.5: 15,5,0	600	99.5	15	3	5	56003.44	2351551	74.47404
99.5: 20,5,0	600	99.5	20	4	5	48461.55	2663631	84.35767
99.5: 25,5,0	600	99.5	25	5	5	42799.22	2860164	90.58189
99.5: 30,5,0	600	99.5	30	6	5	38188.62	2932359	92.86833
99.5: 35,5,0	600	99.5	35	7	5	34882.83	2936343	92.99449
99.5: 40,5,0	600	99.5	40	8	5	32443.83	2936343	92.99449
99.5: 45,5,0	600	99.5	45	9	5	29427.32	2936343	92.99449
99.5: 50,5,0	600	99.5	50	10	5	27179.82	2936343	92.99449
99.5: 6,6,0	600	99.5	6	1	6	67195.69	1763374	55.84637
99.5: 12,6,0	600	99.5	12	2	6	62603.44	1874495	59.36559
99.5: 18,6,0	600	99.5	18	3	6	45070.77	2890394	91.53929
99.5: 24,6,0	600	99.5	24	4	6	46937.09	2684737	85.02609
99.5: 30,6,0	600	99.5	30	5	6	34740.89	2936343	92.99449
99.5: 36,6,0	600	99.5	36	6	6	36301.72	2933730	92.91176
99.5: 42,6,0	600	99.5	42	7	6	28747.96	2936343	92.99449
99.5: 48,6,0	600	99.5	48	8	6	30060.29	2936343	92.99449
99.5: 54,6,0	600	99.5	54	9	6	24676.73	2936343	92.99449
99.5: 60,6,0	600	99.5	60	10	6	24448.03	2936343	92.99449
99.5: 7,7,0	600	99.5	7	1	7	65125.99	2414005	76.45196
99.5: 14,7,0	600	99.5	14	2	7	49920.58	2633643	83.40793
99.5: 21,7,0	600	99.5	21	3	7	41627.58	2924051	92.6052
99.5: 28,7,0	600	99.5	28	4	7	34555.98	2657127	84.15168
99.5: 35,7,0	600	99.5	35	5	7	31272.36	2936343	92.99449
99.5: 42,7,0	600	99.5	42	6	7	30464.26	2936343	92.99449
99.5: 49,7,0	600	99.5	49	7	7	31047.63	2936343	92.99449
99.5: 56,7,0	600	99.5	56	8	7	26843.02	2666089	84.43551
99.5: 63,7,0	600	99.5	63	9	7	25260.36	2936343	92.99449
99.5: 70,7,0	600	99.5	70	10	7	21800.7	2936343	92.99449

99.5: 8,8,0	600	99.5	8	1	8	63077.09	2456356	77.79324
99.5: 16,8,0	600	99.5	16	2	8	47680.14	2914607	92.30611
99.5: 24,8,0	600	99.5	24	3	8	39712.17	2936343	92.99449
99.5: 32,8,0	600	99.5	32	4	8	34803.29	2936343	92.99449
99.5: 40,8,0	600	99.5	40	5	8	28971.52	2936343	92.99449
99.5: 48,8,0	600	99.5	48	6	8	31589	2936343	92.99449
99.5: 56,8,0	600	99.5	56	7	8	30770.98	2690440	85.20672
99.5: 64,8,0	600	99.5	64	8	8	27403.29	2936343	92.99449
99.5: 72,8,0	600	99.5	72	9	8	21303.82	2936343	92.99449
99.5: 80,8,0	600	99.5	80	10	8	19751.93	2936343	92.99449
99.5: 9,9,0	600	99.5	9	1	9	60500.32	2268821	71.85395
99.5: 18,9,0	600	99.5	18	2	9	45348.99	2901080	91.87771
99.5: 27,9,0	600	99.5	27	3	9	52414.14	2422647	76.72566
99.5: 36,9,0	600	99.5	36	4	9	30839.69	2936343	92.99449
99.5: 45,9,0	600	99.5	45	5	9	28033.65	2936343	92.99449
99.5: 54,9,0	600	99.5	54	6	9	32879.38	2936343	92.99449
99.5: 63,9,0	600	99.5	63	7	9	22411.22	2936343	92.99449
99.5: 72,9,0	600	99.5	72	8	9	22746.29	2936343	92.99449
99.5: 81,9,0	600	99.5	81	9	9	23243.32	2936343	92.99449
99.5: 90,9,0	600	99.5	90	10	9	18702.28	2936343	92.99449
99.5: 10,10,0	600	99.5	10	1	10	63626.16	1861482	58.95347
99.5: 20,10,0	600	99.5	20	2	10	60616.66	1929806	61.1173
99.5: 30,10,0	600	99.5	30	3	10	38060.04	2930966	92.82422
99.5: 40,10,0	600	99.5	40	4	10	43782.28	2724502	86.28547
99.5: 50,10,0	600	99.5	50	5	10	26181.25	2936343	92.99449
99.5: 60,10,0	600	99.5	60	6	10	32255.73	2936343	92.99449
99.5: 70,10,0	600	99.5	70	7	10	21156.3	2936343	92.99449
99.5: 80,10,0	600	99.5	80	8	10	25812.04	2936343	92.99449
99.5: 90,10,0	600	99.5	90	9	10	18578.92	2936343	92.99449
99.5: 100,10,0	600	99.5	100	10	10	20004.04	2936343	92.99449
100.0: 1,1,0	600	100	1	1	1	83948.72	618509.2	19.5883
100.0: 2,1,0	600	100	2	2	1	81910.93	1077586	34.12733
100.0: 3,1,0	600	100	3	3	1	80189.99	1414874	44.8093
100.0: 4,1,0	600	100	4	4	1	78200.24	1736343	54.9903
100.0: 5,1,0	600	100	5	5	1	76547.25	1960799	62.09884
100.0: 6,1,0	600	100	6	6	1	74981.02	2202721	69.76057
100.0: 7,1,0	600	100	7	7	1	73169.77	2358437	74.69212
100.0: 8,1,0	600	100	8	8	1	72060.28	2490433	78.87244
100.0: 9,1,0	600	100	9	9	1	70697.62	2618340	82.92328
100.0: 10,1,0	600	100	10	10	1	69270	2659683	84.23263
100.0: 2,2,0	600	100	2	1	2	78618.54	1069245	33.86319
100.0: 4,2,0	600	100	4	2	2	72065.24	1543920	48.89623
100.0: 6,2,0	600	100	6	3	2	67287.33	2156597	68.29979
100.0: 8,2,0	600	100	8	4	2	62197.94	2346870	74.32579
100.0: 10,2,0	600	100	10	5	2	58011.09	2486078	78.73452
100.0: 12,2,0	600	100	12	6	2	54683.54	2725167	86.30653
100.0: 14,2,0	600	100	14	7	2	50189.73	2538817	80.40478
100.0: 16,2,0	600	100	16	8	2	48053.87	2834311	89.76314

100.0: 18,2,0	600	100	18	9	2	43831.67	2625431	83.14786
100.0: 20,2,0	600	100	20	10	2	42692.75	2840929	89.97271
100.0: 3,3,0	600	100	3	1	3	75720.72	979969.5	31.03581
100.0: 6,3,0	600	100	6	2	3	67997.37	1663147	52.67217
100.0: 9,3,0	600	100	9	3	3	61339.36	2134934	67.61375
100.0: 12,3,0	600	100	12	4	3	55935.32	2467733	78.15355
100.0: 15,3,0	600	100	15	5	3	50512.24	2682876	84.96716
100.0: 18,3,0	600	100	18	6	3	47339.98	2795420	88.53144
100.0: 21,3,0	600	100	21	7	3	42919.52	2842450	90.02089
100.0: 24,3,0	600	100	24	8	3	40616.79	2842450	90.02089
100.0: 27,3,0	600	100	27	9	3	38087.64	2842450	90.02089
100.0: 30,3,0	600	100	30	10	3	36212.44	2842450	90.02089
100.0: 4,4,0	600	100	4	1	4	72468.43	1732637	54.87293
100.0: 8,4,0	600	100	8	2	4	62046.2	2366806	74.95716
100.0: 12,4,0	600	100	12	3	4	56596.61	2679930	84.87385
100.0: 16,4,0	600	100	16	4	4	52230.47	2546800	80.6576
100.0: 20,4,0	600	100	20	5	4	44448.03	2837139	89.85268
100.0: 24,4,0	600	100	24	6	4	40519.43	2842450	90.02089
100.0: 28,4,0	600	100	28	7	4	38935.58	2627737	83.2209
100.0: 32,4,0	600	100	32	8	4	36394.39	2842450	90.02089
100.0: 36,4,0	600	100	36	9	4	32335.13	2842450	90.02089
100.0: 40,4,0	600	100	40	10	4	31779.29	2842450	90.02089
100.0: 5,5,0	600	100	5	1	5	73593.49	1050406	33.26654
100.0: 10,5,0	600	100	10	2	5	64362.32	1778945	56.33952
100.0: 15,5,0	600	100	15	3	5	56435.83	2245369	71.11122
100.0: 20,5,0	600	100	20	4	5	50484.11	2569248	81.36855
100.0: 25,5,0	600	100	25	5	5	43908.02	2751455	87.13908
100.0: 30,5,0	600	100	30	6	5	40581.94	2833655	89.74237
100.0: 35,5,0	600	100	35	7	5	36290.65	2842450	90.02089
100.0: 40,5,0	600	100	40	8	5	33994.19	2842450	90.02089
100.0: 45,5,0	600	100	45	9	5	31328.82	2842450	90.02089
100.0: 50,5,0	600	100	50	10	5	29441.02	2842450	90.02089
100.0: 6,6,0	600	100	6	1	6	67747	1673531	53.00102
100.0: 12,6,0	600	100	12	2	6	63223.33	1804806	57.15853
100.0: 18,6,0	600	100	18	3	6	47398.79	2800886	88.70454
100.0: 24,6,0	600	100	24	4	6	48708.72	2601814	82.39992
100.0: 30,6,0	600	100	30	5	6	36239.53	2842450	90.02089
100.0: 36,6,0	600	100	36	6	6	38855.56	2837054	89.85001
100.0: 42,6,0	600	100	42	7	6	30469.83	2842450	90.02089
100.0: 48,6,0	600	100	48	8	6	31719.63	2842450	90.02089
100.0: 54,6,0	600	100	54	9	6	26366.99	2842450	90.02089
100.0: 60,6,0	600	100	60	10	6	26710.97	2842450	90.02089
100.0: 7,7,0	600	100	7	1	7	65822.9	2326021	73.66551
100.0: 14,7,0	600	100	14	2	7	51131.08	2563099	81.17379
100.0: 21,7,0	600	100	21	3	7	43811.45	2842450	90.02089
100.0: 28,7,0	600	100	28	4	7	36540	2594147	82.15708
100.0: 35,7,0	600	100	35	5	7	33563.17	2842450	90.02089
100.0: 42,7,0	600	100	42	6	7	32606.65	2842450	90.02089

100.0: 49,7,0	600	100	49	7	7	32783.91	2842450	90.02089
100.0: 56,7,0	600	100	56	8	7	29475.13	2612464	82.7372
100.0: 63,7,0	600	100	63	9	7	27023.29	2842450	90.02089
100.0: 70,7,0	600	100	70	10	7	23881.39	2842450	90.02089
100.0: 8,8,0	600	100	8	1	8	63263.69	2426418	76.84508
100.0: 16,8,0	600	100	16	2	8	48657.9	2830741	89.65007
100.0: 24,8,0	600	100	24	3	8	40913.32	2842450	90.02089
100.0: 32,8,0	600	100	32	4	8	36100.69	2842450	90.02089
100.0: 40,8,0	600	100	40	5	8	31242.5	2842450	90.02089
100.0: 48,8,0	600	100	48	6	8	32931.91	2842450	90.02089
100.0: 56,8,0	600	100	56	7	8	32108.59	2654148	84.05733
100.0: 64,8,0	600	100	64	8	8	28906.37	2842450	90.02089
100.0: 72,8,0	600	100	72	9	8	23453.8	2842450	90.02089
100.0: 80,8,0	600	100	80	10	8	22031.61	2842450	90.02089
100.0: 9,9,0	600	100	9	1	9	61168.81	2160582	68.426
100.0: 18,9,0	600	100	18	2	9	47443.16	2798726	88.63614
100.0: 27,9,0	600	100	27	3	9	53032.88	2312908	73.25019
100.0: 36,9,0	600	100	36	4	9	32780.42	2842450	90.02089
100.0: 45,9,0	600	100	45	5	9	30363.49	2842450	90.02089
100.0: 54,9,0	600	100	54	6	9	35697.43	2842450	90.02089
100.0: 63,9,0	600	100	63	7	9	24722.7	2842450	90.02089
100.0: 72,9,0	600	100	72	8	9	24500.83	2842450	90.02089
100.0: 81,9,0	600	100	81	9	9	25461.92	2842450	90.02089
100.0: 90,9,0	600	100	90	10	9	20812.94	2842450	90.02089
100.0: 10,10,0	600	100	10	1	10	64175.19	1769086	56.02726
100.0: 20,10,0	600	100	20	2	10	61295.2	1853404	58.69764
100.0: 30,10,0	600	100	30	3	10	40493.59	2833926	89.75095
100.0: 40,10,0	600	100	40	4	10	45733.5	2637125	83.51821
100.0: 50,10,0	600	100	50	5	10	28494.46	2842450	90.02089
100.0: 60,10,0	600	100	60	6	10	35005.46	2839881	89.93953
100.0: 70,10,0	600	100	70	7	10	23330.89	2842450	90.02089
100.0: 80,10,0	600	100	80	8	10	27536.38	2842450	90.02089
100.0: 90,10,0	600	100	90	9	10	20714.34	2842450	90.02089
100.0: 100,10,0	600	100	100	10	10	22503.01	2842450	90.02089

Приложение В

Акт внедрения результатов диссертационной работы
Акционерного общества «Российские космические системы»

УТВЕРЖДАЮ

Директор проектов по созданию
командных радиолиний –
заместитель генерального конструктора
АО «Российские космические системы»



С.А. Яхутин

2026 г.

АКТ

об использовании научного результата диссертации
Иванушкина Максима Александровича
в АО «Российские космические системы»

Комиссия в составе: председателя комиссии – начальника отделения А.С. Семочкина; членов комиссии: начальника отдела Г.Б. Павлова и начальника бюро С.В. Авраменко, составила настоящий акт о том, что полученный в диссертации М.А. Иванушкина научный результат «Программный комплекс для моделирования функционирования низкоорбитальных космических систем» использован при оценке возможностей организации информационного обмена в командной радиолинии «Борт – Борт» для обеспечения непрерывного, устойчивого управления автоматическими космическими аппаратами. Данные полученных оценок легли в основу подразделов 2.1 Формирование предложений по особенностям реализации на КА «ГСО-М» управления перспективной ОГ НКК, 2.1.1 Предложения по управлению КА низкоорбитального космического комплекса, 2.1.2 Предложения по облику БА КИС навигационного КА с реализацией МРЛ, входящих в научно-технический отчет по СЧ НИР «Развитие-ГЛОНАСС-РКС».

Использование научного результата М.А. Иванушкина позволило обосновать технические характеристики командно-измерительных и телекомандных систем перспективных автоматических космических аппаратов на низких околоземных орбитах.

Председатель комиссии:
Начальник отделения создания бортовых
радиокомплексов командно-измерительных
и телекомандных систем КА

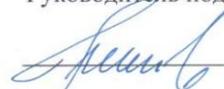
А.С. Семочкин

Члены комиссии:
Начальник отдела создания бортовой
аппаратуры КИС автоматических КА
Начальник бюро проведения научно-
аналитической, экспертной работы

Г.Б. Павлов

С.В. Авраменко

Приложение Г

Протокол внедрения результатов диссертационной работы
Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс»УТВЕРЖДАЮ
Руководитель подсекции №1 НТС
О.Г. Федоренко**ПРОТОКОЛ**заседания подсекции №1 секции поисковых и фундаментальных НИОКР
(НИОТР) НТС АО «РКЦ «Прогресс»03.03.2016г.№4/1100**Присутствовали:**

Руководитель подсекции №1 НТС – О.Г. Федоренко.

Члены подсекции №1 НТС: Л.Б. Шилов, В.А. Малиновский, Е.С. Жуков,
С.С. Раубе, А.А. Харитонов.**Рассматривались вопросы:**

1. Возможное использование результатов диссертационной работы Иванушкина Максима Александровича в деятельности АО «РКЦ «Прогресс».

Проведено обсуждение результатов диссертационной работы М.А. Иванушкина. Участниками совещания отмечено, что применение программы RUSSIAN SPACE SYSTEM DEVELOPER (RSSD) и методики выбора расположения наземных станций приёма возможно на ранних этапах проектирования перспективных низкоорбитальных многоспутниковых группировок дистанционного зондирования Земли, реализуемых на платформе формата «Аист» и меньше, что позволит существенно сократить количество требуемых приёмных антенных комплексов мобильного или стационарного (компактного) исполнения при сохранении заданных требований по оперативности доставки информации, что способствует оптимизации наземного сегмента и снижению затрат на реализацию космических систем.

Разработанная методика оценки показателей функционирования многоспутниковых систем ДЗЗ на основе имитационного моделирования соответствует общей тенденции цифровизации и автоматизации проектных работ на предприятии.

Секретарь подсекции №1 НТС



А.В. Бутко

Приложение Д

Акт внедрения результатов диссертационной работы
Общества с ограниченной ответственностью
«Специальный Технологический Центр»



«Специальный Технологический Центр»
(ООО «СТЦ»)

пр-кт Непокорённых, д. 17, к. 4, литера В, помещ. 3Н, г. Санкт-Петербург, 195220
Тел. (812) 244-33-13, тел./факс (812) 535-77-00, (812) 535-58-16 E-mail: office@stc-spb.ru

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «СТЦ»

кандидат экономических наук



Р.Д. Агафонников
марта 2026 г.

М. П.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Иванушкина Максима Александровича, представленной на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

председатель комиссии – ученый секретарь, кандидат технических наук, профессор
Аладинский В.А.;

члены комиссии: начальник научно-технического центра – генеральный конструктор
по космическим системам и комплексам, кандидат технических наук Космодемьянский Е.В.;

начальник отдела Волгин С.С.,
установила, что при выполнении Обществом с ограниченной ответственностью
«Специальный Технологический Центр» инициативной опытно-конструкторской работы
шифр «Группировка МКА-3U – 4 запуск» (далее – ОКР) использован следующий научный
результат диссертационного исследования Иванушкина М.А.:

специальное программное обеспечение «Программа *Constellation modeler (ConMod)*
для моделирования целевого функционирования космической системы мониторинга».

Применение в инициативной ОКР научного результата Иванушкина М.А. позволило на
основе компьютерного моделирования получить необходимые значения пространственных
параметров орбитального кластера из четырех малых космических аппаратов формата
Cubesat 3U, предназначенного для радиотехнического мониторинга наземных объектов.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

В.А. Аладинский

Е.В. Космодемьянский

С.С. Волгин

Приложение Е

Акт внедрения результатов диссертационной работы в образовательный процесс
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»



АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Методика оценки показателей функционирования многоспутниковых систем мониторинга Земли с учётом выбора координат наземных пунктов приёма информации», выполненного на кафедре космического машиностроения имени Генерального конструктора Д. И. Козлова, внедрены в учебный процесс кафедры космического машиностроения имени генерального конструктора Д. И. Козлова института авиационной и ракетно-космической техники Самарского университета (протокол №2 от «29» сентября 2025 г.).

Указанные результаты включены в курс «Организация и обеспечение полета околоземных и межпланетных космических аппаратов», направления подготовки 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов.

И.о. заведующего кафедрой КМ
к.т.н., доцент

 /Сафронов С.Л.
« 20 » февраля 2026 г.

Соискатель ученой степени

 /Иванушкин М.А.
« 16 » февраля 2026 г.

Начальник методического отдела
учебно-методического управления
к.т.н., доцент

 /Вдовин Р.А.
« 25 » февраля 2026 г.

Начальник отдела сопровождения
научных исследований
к.т.н., доцент

 /Родионов Л.В.
« 24 » февраля 2026 г.

И.С.И.