



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационных технологий и систем безопасности

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(Бакалавр)

На тему **«Оптимизация сети базовых станций сотовой связи в арктическом (субарктическом) регионе России»**

Исполнитель **Нестерюк Илья Игоревич**

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель **д.т.н., профессор**

(ученая степень, ученое звание)

**Завгородний Владимир Николаевич**

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

**(подпись)**

**д.т.н., профессор**

(ученая степень, ученое звание)

**Бурлов Вячеслав Георгиевич**

(фамилия, имя, отчество)

«    »            2025 г.

Санкт-Петербург  
2025 г.

## Оглавление

Введение .....	5
Глава 1: Особенности мобильной связи в арктическом регионе и методы её оптимизации .....	9
1.1 Географические и климатические особенности Арктической зоны Российской Федерации.....	9
1.2 Текущая ситуация и перспективы развития мобильной связи в Арктике .....	11
1.3. Методы исследования операций в задачах оптимизации сетей связи ...	15
1.4. Характеристики сети мобильной связи, влияющие на размещение базовых станций.....	18
Вывод .....	21
ГЛАВА 2. Математическое моделирование и реализация алгоритмов оптимизации .....	22
2.1. Формулировка задачи оптимального размещения базовых станций .....	22
2.2. Сравнения различных методов решения задачи (обзор возможностей и ограничений) для обоснования выбора модели линейного программирования. ....	25
2.3. Математическая модель оптимизации сети базовых станций .....	30
2.4. Реализация вычислительных алгоритмов для оптимизации сети .....	33
Карта станций мобильной связи.....	39
2.5. Оценка эффективности решения.....	42
Вывод .....	44
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	46
1. Основные выводы исследования.....	46
2. Практическое применение результатов.....	47
3. Перспективы дальнейших исследований .....	49
Заключительный итог .....	51
Список литературы .....	52
Приложения.....	54

## **Введение**

Современные технологии информационно-коммуникационного профиля имеют критическое значение для развития территорий, функционирующих в условиях экстремальных климатических и географических особенностей. Арктические и субарктические зоны РФ характеризуются существенным экономическим и стратегическим ресурсом, однако формирование инфраструктуры связи в этих районах сопряжено со значительными трудностями. Обеспечение надежного и стабильного мобильного покрытия выступает необходимым условием как для повышения качества жизни жителей, так и для эффективной деятельности промышленных и научных комплексов, транспортной инфраструктуры, а также систем безопасности.

### **Актуальность исследования**

В последние годы государственная политика РФ уделяет активное внимание освоению Арктики, претворяя в жизнь стратегические программы, в частности, «Стратегию развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». Данная стратегия затрагивает аспекты транспортной доступности, энергообеспечения, экологической безопасности, а также цифровизации региона, охватывающей и совершенствование телекоммуникационной инфраструктуры.

Несмотря на применение передовых технологических решений, включая спутниковую связь и радиорелейные линии, значительные площади Арктики все еще лишены устойчивого мобильного покрытия. Согласно данным Минцифры России за 2023 год, приблизительно 40% населенных пунктов арктического региона либо полностью не охвачены связью, либо испытывают серьезные проблемы с качеством предоставляемых услуг. Это порождает существенные сложности для местного населения, научных и поисково-

спасательных экспедиций, а также для функционирования компаний, занятых в сфере добычи ресурсов, энергетики и логистических операций.

Ключевыми проблемами, с которыми сталкиваются операторы мобильной связи в Арктике, выступают:

- Экстремальные погодные условия: продолжительные низкие температуры, интенсивные ветровые нагрузки, обледенение оборудования, вечномёрзлые грунты.
- Дефицит энергоресурсов: отсутствие стабильных электросетей в труднодоступных локациях диктует необходимость применения автономных источников питания (солнечные панели, дизель-генераторы, ветроэнергетические установки).
- Значительные расстояния между объектами: прокладка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) экономически нецелесообразна, а спутниковые каналы характеризуются значительной задержкой сигнала (латенцией).
- Высокая стоимость реализации и эксплуатации: сложности логистики при доставке оборудования, потребность в специализированных инженерных решениях.

Оптимальное планирование мест развертывания базовых станций способствует снижению капитальных и операционных затрат на создание сети при одновременном достижении максимальной зоны охвата территории.

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является разработка математической модели и вычислительных алгоритмов для оптимального размещения базовых станций мобильной связи в арктическом и субарктическом регионах России с использованием методов линейного программирования.

Для реализации поставленной цели требуется последовательное решение следующих задач:

- Провести анализ специфики организации мобильной связи в Арктике, учитывающей технические, географические и экономические аспекты.
- Исследовать методы исследования операций, применимые для решения задач оптимизации телекоммуникационных сетей.
- Выполнить формализацию задачи оптимального размещения базовых станций и построить соответствующую математическую модель на базе методов линейного программирования.
- Разработать и программно реализовать вычислительный алгоритм решения поставленной задачи с применением симплекс-метода.
- Провести практические расчеты и выполнить анализ результатов для оценки эффективности предложенной модели.

### **Методология исследования**

Методологическую основу исследования составляют:

- Методы исследования операций, обеспечивающие формализацию задачи размещения базовых станций как задачи оптимизации.
- Линейное программирование, применяемое для поиска оптимального решения в рамках заданных ограничений.
- Симплекс-метод как один из наиболее эффективных алгоритмов решения задач линейного программирования.
- Геоинформационные технологии (ГИС), используемые для пространственной визуализации зон оптимального покрытия территории.
- Программные средства: Python (с использованием библиотек SciPy, PuLP), MATLAB, позволяющие реализовать и протестировать разработанную модель.

## **Обзор существующих решений**

В Российской Федерации реализуются инициативы по развитию мобильной связи в Арктике, в том числе:

- Проект «Экспресс-РВ» – перспективная спутниковая система связи, разрабатываемая ГПКС, предназначенная для обеспечения интернет-доступа в труднодоступных районах.
- Развитие оптоволоконных линий связи (ВОЛС) на Крайнем Севере, включая проекты типа «Северный цифровой путь».
- Развертывание автономных базовых станций с использованием альтернативных источников энергии (солнечные панели, ветрогенераторы).

Тем не менее, существующие решения характеризуются рядом ограничений, обусловленных высокой стоимостью внедрения и недостаточной эксплуатационной эффективностью в условиях Крайнего Севера.

## **Структура работы**

Работа состоит из двух основных глав. Первая глава посвящена анализу особенностей мобильной связи в Арктике, рассмотрению существующих технологических решений и нормативных требований, а также обоснованию применимости методов линейного программирования. Вторая глава содержит разработку математической модели, алгоритмов оптимизации, программную реализацию симплекс-метода и анализ полученных результатов.

В заключении формулируются ключевые выводы, обобщаются итоги исследования и определяются перспективные направления для дальнейшей работы.

## **Глава 1: Особенности мобильной связи в арктическом регионе и методы её оптимизации**

### **1.1 Географические и климатические особенности Арктической зоны Российской Федерации**

#### Географическое положение и рельеф

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) охватывает северные территории субъектов РФ, включая Мурманскую область, Архангельскую область, Республику Коми, Республику Саха (Якутия), Красноярский край, Ямало-Ненецкий автономный округ, Чукотский автономный округ и Ненецкий автономный округ. Общая площадь АЗРФ превышает 5 миллионов квадратных километров и включает островные территории: архипелаг Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Северная Земля, Новосибирские острова.

Рельеф территории характеризуется значительным разнообразием: западные районы представлены преимущественно низменностями и заболоченными тундрами, тогда как восточные включают возвышенности и горные массивы. Ярким примером являются горы Бырранга на полуострове Таймыр – одни из самых северных горных систем планеты. Вечная мерзлота распространена на площади до 65% территории АЗРФ, что существенно осложняет строительство зданий и объектов инфраструктуры. Вследствие постоянного промерзания грунтовой основы требуется использование свайных или модульных конструкций, поскольку традиционные фундаментные технологии в этих условиях демонстрируют низкую эффективность.

#### **Климатические условия**

Климат Арктики характеризуется экстремальной суровостью и резкой континентальностью. Зимний период может длиться до 9 месяцев, при этом температуры воздуха способны опускаться до  $-60^{\circ}\text{C}$  в регионах Якутии и Чукотки. Инфраструктура испытывает экстремальные ветровые воздействия, достигающие ураганных значений в 35-40 м/с, особенно

в районах Баренцева моря. Полярная ночь, продолжительность которой составляет до 120 дней в году, создает серьезные затруднения для эксплуатации объектов связи из-за резкого снижения доступности солнечной энергии, критичной для работы альтернативных источников электропитания.

Низкие температурные показатели в сочетании с повышенной влажностью воздуха вызывают интенсивное обледенение конструкций базовых станций, антенных систем и солнечных панелей. Это приводит к снижению их эксплуатационной эффективности и требует организации частых сервисных мероприятий. Для противодействия обледенению применяются технологии, такие как обогреваемые кабели и нанесение антикоррозийных покрытий, однако их использование неизбежно влечет рост операционных затрат.

Энергосбережение в условиях Арктики представляет собой одну из ключевых проблем. Доставка топлива (прежде всего, дизельного) к удаленным объектам крайне затруднена. Широко используются дизельные генераторы, но они нуждаются в регулярной дозаправке, что сопряжено с высокими финансовыми издержками и сложностями логистического характера. Альтернативные решения, включающие ветрогенераторы и солнечные панели, демонстрируют существенное снижение эффективности в период полярной ночи, что ограничивает их круглогодичное применение в качестве основного источника энергии.

### **Население и экономика**

Население АЗРФ распределено неравномерно: основная часть проживает в городах, таких как Норильск (около 180 тыс. человек), Салехард, Анадырь и Дудинка. В мелких поселениях, например, Диксон (около 500 жителей), проживают в основном работники метеорологических станций, военных объектов и сезонных экспедиций.

Неравномерность заселения связана с тяжелыми условиями жизни, отсутствием развитой транспортной сети и ограниченными возможностями

ведения сельского хозяйства. В регионе развиты добыча нефти и газа (Ямало-Ненецкий автономный округ), добыча никеля и меди (Норильский промышленный район), рыболовство (Чукотка и Карское море).

Экономическая значимость региона обусловлена наличием стратегических запасов природных ресурсов, а также важностью Северного морского пути, обеспечивающего торговые маршруты между Европой и Азией. Развитие связи в этих районах необходимо для эффективного управления логистикой, добывающими предприятиями и обеспечением безопасности.

## **1.2 Текущая ситуация и перспективы развития мобильной связи в Арктике**

### Существующее состояние инфраструктуры

На текущий момент зона охвата мобильной связью в АЗРФ остается недостаточной. Крупные населенные пункты и промышленные объекты обеспечены связью, однако обширные промежуточные территории остаются непокрытыми. В удаленных локациях применяются спутниковые технологии, которые, однако, характеризуются высокой латентностью сигнала и ограниченной пропускной способностью.

Операторы МТС и Мегафон активно расширяют сети в северных регионах. К примеру, в 2022 году Мегафон ввел в эксплуатацию первую базовую станцию 4G на дрейфующей ледовой базе в Арктике.

Ключевые сложности для операторов:

- Высокие затраты на прокладку волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).
- Трудности транспортировки оборудования в труднодоступные районы.
- Необходимость развертывания энергонезависимых базовых станций с использованием солнечных панелей и ветрогенераторов.

- Проведение технического обслуживания в условиях экстремально низких температур.

#### Государственная политика и инициативы

В 2020 году была утверждена "Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года". В рамках данной стратегии рассматриваются:

- развитие спутниковой связи для покрытия труднодоступных районов,
- расширение оптоволоконных сетей вдоль Северного морского пути,
- создание автономных базовых станций с альтернативными источниками энергии.

#### Технологические проекты и перспективы

Для решения проблем связи в Арктике российские ученые и компании разрабатывают следующие решения:

- Проект "**Экспресс-РВ**" — орбитальная спутниковая группировка для обеспечения связи в высоких широтах.
- Применение **низкоорбитальных спутников** для сокращения задержек сигнала (разрабатывается ГК "Роскосмос").
- Разработка **энергоэффективных базовых станций** с системой автономного обогрева и антикоррозийной защитой.

Таким образом, развитие мобильной связи в российской Арктике представляет собой сложную, но стратегически приоритетную задачу, требующую комплексного подхода с учетом региональной специфики.

#### Проблемы качества связи и интернета в Арктическом регионе России

Связь в Арктике — это не просто удобство или комфорт. Это вопрос безопасности, жизнедеятельности и присутствия государства в стратегически

важном регионе. На первый взгляд может показаться, что интернет и мобильная связь — это второстепенные элементы в суровых широтах, где главное — топливо, продовольствие и тепло. Но в реальности всё обстоит иначе. Арктика XXI века — это не «белое пятно» на карте, а территория, где действуют газовые промыслы, военные базы, научные станции, работают экологи, строятся логистические маршруты и развиваются новые поселения. И в этих условиях отсутствие стабильной и надёжной связи становится критическим фактором.

#### 1) Ограниченное покрытие и “мертвые зоны”

Значительная часть арктических территорий РФ не охвачена сотовой связью. Даже в прибрежных поселках с населением в сотни человек связь либо отсутствует, либо нестабильна. В ряде населенных пунктов Ямала и на острове Новая Земля доступен лишь слабый сигнал вблизи ретрансляционных мачт. Внутри помещений сигнал часто отсутствует. Вне населенных пунктов (зимники, акватории, промобъекты) покрытие практически нулевое. Вахтовики, геологи и спасатели вынуждены использовать спутниковые телефоны, подверженные сбоям из-за погоды.

#### 2) Низкая скорость интернета и высокая задержка

Даже там, где связь технически доступна, скорость передачи данных оставляет желать лучшего. Типичная ситуация — скорость 0,5–2 Мбит/с с постоянными обрывами соединения. Смотреть видео, проводить видеоконференции, загружать карты или отправлять крупные файлы невозможно. Это особенно критично для:

- врачей и телемедицины;
- дистанционного обучения;
- работы промышленных предприятий;
- мониторинга и охраны окружающей среды;
- координации спасательных и транспортных служб.

Спутниковая связь (например, Гонец или Inmarsat) не решает проблему из-за высокой латентности и ограниченной пропускной способности, что делает невозможным внедрение промышленного интернета вещей (IoT), требующего обмена данными в реальном времени.

### 3) Частые сбои и нестабильность связи

Экстремальные условия Арктики (перепады температур, метели, обледенение, ураганные ветра) приводят к выходу оборудования из строя. Обмерзание антенн, неэффективность солнечных панелей в полярную ночь, потребность в постоянном обслуживании дизель-генераторов – типичные проблемы. Любой сбой приводит к потере связи на огромной площади. Ремонт занимает недели из-за сложной логистики (доступ возможен только воздушным или морским транспортом)

### 4) Ограниченные ресурсы и устаревшее оборудование

Во многих отдалённых поселениях связь обеспечивается по старым радиоканалам или через маломощные базовые станции, установленные ещё 10–15 лет назад. Они не поддерживают современные стандарты (4G и тем более 5G), не масштабируются и не ремонтируются — производители уже сняли их с производства.

Кроме того, сами операторы сотовой связи не спешат модернизировать арктические сети: из-за малочисленности населения инвестиции долго не окупаются, а строительство новой инфраструктуры требует огромных затрат.

### 5) Проблема “цифрового неравенства”

В то время как в городах центральной России разворачивают сети 5G, вводят «умные дома» и цифровые госуслуги, жители Арктики остаются отрезанными от этих возможностей. Они не могут воспользоваться онлайн-записью к врачу, дистанционным обучением, онлайн-банкингом, не могут подать жалобу или получить справку через интернет.

Это формирует серьёзное **социальное и инфраструктурное неравенство** между регионами. Люди в Арктике чувствуют себя забытыми, несмотря на то что именно они работают в тяжелейших условиях на благо страны.

#### б) Безопасность и чрезвычайные ситуации

Особое значение связь имеет в вопросах безопасности. В условиях Крайнего Севера спасательные операции крайне сложны. Потеря сигнала — это реальная угроза жизни. Бездействующая базовая станция или непокрытая территория может стать критическим фактором при поиске пропавших людей, координации эвакуации или ликвидации последствий аварий.

#### Вывод

Проблема качества связи и интернета в Арктике — это не вопрос удобства, а вопрос развития, равенства и безопасности. Без современной телекоммуникационной инфраструктуры невозможна цифровизация региона, невозможны современные условия жизни, эффективное управление ресурсами, охрана окружающей среды и оперативное реагирование на ЧС.

Эта проблема требует системного подхода: комплексной модернизации сетей, использования гибридных технологий (оптоволокно + спутники + автономные БС), привлечения государства и крупных операторов связи.

Именно для этого и необходимы научно обоснованные методы оптимального размещения базовых станций — такие, как описаны в этой работе.

### **1.3. Методы исследования операций в задачах оптимизации сетей связи**

Развитие телекоммуникационной инфраструктуры сочетает технические и математические вызовы. Ключевая задача – оптимизация размещения оборудования (базовых станций) для обеспечения покрытия при ограниченных

ресурсах. Эти задачи решаются методами исследования операций (ИО) – прикладной дисциплины, фокусирующейся на поиске оптимальных решений в сложных системах.

Основные задачи оптимизации в информационно-коммуникационных технологиях (ИКТ)

В области ИКТ к задачам оптимизации относятся:

- Размещение базовых станций и точек доступа (placement problem);
- Оптимизация зон покрытия (coverage optimization);
- Распределение частот и пропускной способности (frequency and bandwidth allocation);
- Оптимизация маршрутов передачи данных (routing optimization);
- Управление сетевыми ресурсами и качеством обслуживания (QoS/QoE management);
- Снижение затрат на инфраструктуру при обеспечении заданного уровня обслуживания.

Все эти задачи объединяет необходимость нахождения наилучшего варианта при множестве ограничений — экономических, технических, географических.

Методы решения задач размещения и покрытия территории

Существует несколько основных подходов к решению задач размещения и покрытия:

1. Детерминированные методы:
  - линейное и целочисленное программирование (LP, ILP);
  - жадные и комбинаторные алгоритмы;
  - построение минимальное доминирующее множество.
2. Стохастические и эвристические методы:
  - генетические алгоритмы;

- муравьиные алгоритмы;
- имитация отжига;
- роевые методы (PSO).

### 3. Геометрические подходы:

- покрытие окружностями;
- воронойные диаграммы;
- модели покрытия на основе расстояний.

### 4. Сетевые методы:

- моделирование сети как графа;
- минимальное остовное дерево;
- маршрутизация и потоки в сетях.

Для арктического региона России особое значение приобретают именно методы, позволяющие строго учитывать ограниченность ресурсов и географическую специфику, что делает детерминированные методы, и в частности линейное программирование, особенно актуальными.

Линейное программирование и его применение в телекоммуникациях

Линейное программирование (ЛП) — это метод оптимизации, в котором как целевая функция, так и все ограничения являются линейными. Несмотря на простоту формализации, ЛП применяется к очень широкому кругу задач, в том числе в телекоммуникациях.

Примеры применения ЛП в задачах связи:

- определение минимального количества базовых станций для покрытия всех потребителей;
- оптимизация использования частотных диапазонов;
- планирование маршрутов передачи данных с минимальной задержкой;
- размещение узлов сетей передачи данных при ограниченном бюджете.

Ключевые преимущества ЛП:

- точность и строгость решения;
- возможность учёта множества ограничений (площадь покрытия, радиус действия, стоимость, доступность электроснабжения);
- поддержка в популярных языках программирования (Python, MATLAB) и библиотеках (PuLP, Gurobi, SciPy).

В контексте Арктики применение ЛП особенно оправдано, так как:

- каждый объект (населённый пункт, станция) можно описать координатами;
- известны ограничения по радиусу действия оборудования;
- необходимо минимизировать количество объектов из-за высокой стоимости их установки и обслуживания.

Таким образом, линейное программирование является ключевым инструментом для построения математической модели размещения БС в условиях Арктики с ее ресурсными ограничениями, экстремальным климатом и высокой стоимостью инфраструктуры.

#### **1.4. Характеристики сети мобильной связи, влияющие на размещение базовых станций**

При проектировании сотовых сетей в труднодоступных регионах (таких как Арктика) необходимо учитывать не только географию, демографию и экономику, но и технические параметры сети, определяющие её надежность, производительность и зону охвата. Ниже представлены ключевые характеристики, критичные для оптимизации размещения БС.

##### **1. Радиус действия базовой станции**

Один из важнейших факторов — это зона покрытия, которую может обеспечить одна базовая станция (БС). Радиус зависит от:

- стандарта связи (2G, 3G, 4G, LTE, 5G);
- мощности передатчика;
- высоты и типа антенны;
- характера рельефа и плотности застройки;
- климатических условий.

Для арктических и субарктических условий (низкая плотность застройки, открытые пространства) при использовании оборудования стандарта LTE, радиус действия может достигать 10–30 км, но в реальности надёжное покрытие обеспечивается в радиусе 12–15 км, особенно с учётом погодных помех (снег, ветер, влажность, инверсия температуры).

Планирование плотности БС должно основываться на практическом, а не теоретическом радиусе действия.

## 2. Пропускная способность и нагрузка на станцию

Базовая станция должна обеспечивать не только наличие сигнала, но и достаточную пропускную способность — т.е. возможность одновременной передачи данных большим числом абонентов или устройств.

Факторы, влияющие на нагрузку:

- количество пользователей;
- потребление трафика (голос, видео, IoT, телеметрия);
- технологии (LTE может обслуживать сотни пользователей, но распределение ресурсов зависит от качества сигнала и условий).

В промышленной Арктике, где работают добывающие предприятия и научные станции, трафик может быть нестандартно высоким, особенно при передаче данных с датчиков, видеонаблюдения или метеостанций. Это требует не просто покрытия, но и устойчивой работы в условиях нагрузки.

### 3. Тип и конфигурация базовой станции

Основные типы БС по мощности и области применения:

- Макростанции — высокая мощность, обслуживают до 30 км в условиях открытой местности;
- Микростанции и пикосоты — меньшая мощность, используются в населённых пунктах для "заполнения" покрытия или повышения плотности сети;
- Ретрансляторы — повторители сигнала, могут использоваться для увеличения охвата в гористой или пересечённой местности;
- Автономные мачты с собственными источниками энергии — используются там, где нет доступа к электросетям.

В арктических условиях приоритет отдается макростанциям с автономным питанием, размещаемым вблизи населённых пунктов или промышленных объектов.

### 4. Требования к энергетике и логистике

Каждая станция требует:

- Стабильного электропитания (дизель, ветрогенератор, солнечная панель);
- Регулярного зимнего обслуживания;
- Доступа для ремонтных бригад.

Эти факторы напрямую влияют на выбор места: даже технически пригодная точка может быть отвергнута из-за логистической недоступности или невозможности снабжения топливом.

### 5. Надёжность и резервирование

В условиях Крайнего Севера высокая надёжность сети жизненно необходима:

- Дублирование покрытия (желательно, чтобы один населённый пункт попадал в зону действия не одной, а двух станций);
- Возможность переключения между станциями при отказе одной из них;
- Использование "умных" алгоритмов балансировки нагрузки.

Такие требования повышают стоимость и сложность сети, но при этом радикально повышают её устойчивость.

## **Вывод**

Планируя размещение базовых станций в Арктике, важно учитывать не только географию и экономику, но и всю совокупность инженерных параметров сети: зону покрытия, мощность, пропускную способность, требования к энергетике и климатические допуски. Эти характеристики напрямую влияют на результат модели оптимизации, определяя реалистичность полученного решения и его пригодность для практической реализации.

## ГЛАВА 2. Математическое моделирование и реализация алгоритмов оптимизации

### 2.1. Формулировка задачи оптимального размещения базовых станций

- Определение целевой функции: минимизация затрат при максимальном покрытии
- Определение ограничений: технические, географические, экономические
- Требования к качеству связи и пропускной способности

Размещение БС мобильной связи в арктических и субарктических регионах (полуостров Ямал, остров Новая Земля) – сложная задача, требующая учета географических, климатических и экономических факторов. Суровый климат, удаленность населенных пунктов и высокая стоимость инфраструктуры диктуют необходимость строгой математической формализации.

Определение целевой функции: минимизация затрат при максимальном покрытии

Целью данной задачи является минимизация общих затрат на развертывание сети базовых станций при обеспечении устойчивой мобильной связи для всех населённых пунктов на выбранной территории. Это означает, что необходимо найти такое множество точек размещения станций, которое обеспечит покрытие всех важных объектов при наименьшем количестве установок.

Формально целевая функция может быть записана как:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (1)$$

где:

- $Z$  - общая стоимость установки сети;
- $c_i$  - затраты на установку базовой станции в точке  $i$ ;
- $x_i \in \{0,1\}$  - бинарная переменная: 1, если станция установлена в точке  $i$ ; иначе 0;
- $n$  - общее количество потенциальных точек размещения.

Целевая функция предполагает минимизацию затрат без потери качества покрытия, т.е. при условии, что каждый населённый пункт будет находиться в зоне устойчивого сигнала хотя бы от одной базовой станции.

Определение ограничений: технические, географические, экономические

Для корректной постановки задачи необходимо ввести систему ограничений, отражающую реальные условия эксплуатации и установки оборудования в арктических регионах:

- Технические ограничения:
  - Радиус действия базовой станции в условиях Крайнего Севера не превышает 20–30 км. Это значение зависит от рельефа, температуры воздуха и влажности.
  - Некоторые населённые пункты могут находиться вне досягаемости друг от друга в пределах одного радиуса, что требует дополнительной станции.
- Географические ограничения:
  - Территории покрыты вечной мерзлотой, что существенно влияет на строительство фундаментов и устойчивость конструкций.
  - Распределение населённых пунктов неравномерное, некоторые из них находятся на удалённых побережьях (например, Сабетта, Новый Порт, мыс Каменный).
  - Местами отсутствует возможность круглогодичной логистики, что усложняет техническое обслуживание.

- Экономические ограничения:
  - Стоимость доставки оборудования и обслуживания в арктических условиях может в 2–3 раза превышать среднероссийские значения.
  - В удалённых районах требуется автономное энергоснабжение (солнечные панели, дизель-генераторы, ветряки), что увеличивает капитальные вложения.
  - Ограничен человеческий ресурс: для обслуживания необходимы выездные бригады, логистика которых также должна быть учтена.

Эти ограничения в модели реализуются через допустимые значения переменных, расстояний, и через штрафные коэффициенты в случае недостижимого покрытия.

#### Требования к качеству связи и пропускной способности

Одним из ключевых условий является не только физическое покрытие территории, но и обеспечение минимально допустимого уровня качества связи. К основным требованиям относятся:

- Наличие устойчивого сигнала в пределах населённого пункта (уровень сигнала выше  $-100$  dBm);
- Минимальная задержка передачи данных — особенно важно для промышленных предприятий, использующих M2M-коммуникации;
- Пропускная способность: необходимо предусмотреть, чтобы одна базовая станция могла обслуживать количество пользователей, соответствующее населению и промышленным нагрузкам в зоне покрытия;
- Резервирование сигнала: в районах со сложными погодными условиями желательна зона перекрытия от двух и более станций для повышения надёжности сети.

Таким образом, задача оптимального размещения базовых станций включает не только экономическую минимизацию, но и обеспечение

гарантированного уровня обслуживания связи, что особенно важно для территорий с суровыми природными условиями и ограниченной транспортной доступностью.

## **2.2. Сравнения различных методов решения задачи (обзор возможностей и ограничений) для обоснования выбора модели линейного программирования.**

Выбор математического метода решения задачи оптимального размещения базовых станций имеет принципиальное значение, поскольку от него зависит точность, воспроизводимость, вычислительная сложность и практическая реализуемость проекта. Задачи такого типа относятся к классу задач комбинаторной оптимизации и могут быть решены различными подходами. Ниже приведён сравнительный обзор методов, применяемых в мировой практике, с анализом их применимости к условиям арктического региона России.

### **1. Методы линейного и целочисленного программирования**

Описание:

Методы линейного программирования (ЛП) позволяют решать задачи оптимизации с линейной целевой функцией и системой линейных ограничений. Если переменные могут принимать только целые (или бинарные) значения, задача превращается в задачу целочисленного линейного программирования (ЦЛП, ILP — Integer Linear Programming). Наиболее известные алгоритмы: симплекс-метод, метод ветвей и границ, алгоритм Гомори.

Применение в задаче размещения БС:

- Формализация: каждая потенциальная точка установки станции — бинарная переменная (0 или 1);

- Ограничения: покрытие всех потребителей, минимальное число станций, бюджет;
- Цель: минимизация затрат или количества станций.

Преимущества:

- Формально строгий подход, дающий гарантированно оптимальное решение (если найдено);
- Хорошо поддерживается в программных средствах (PuLP, Gurobi, CPLEX, SciPy, MATLAB);
- Легко верифицировать и анализировать решение;
- Позволяет учесть множество ограничений (географических, технических, экономических).

Недостатки:

- Требуется полная структура входных данных;
- При увеличении размера задачи (много переменных и ограничений) резко возрастает сложность;
- Плохо работает при стохастических, многокритериальных и динамически меняющихся условиях;
- Иногда требуется аппроксимация реальных условий (например, округление координат, дискретизация карты).

2. Метаэвристические методы (генетические алгоритмы, муравьиные алгоритмы, имитация отжига и др.)

Описание:

Метаэвристики — это адаптивные алгоритмы, вдохновлённые природными или социальными процессами, направленные на поиск приближённого (почти оптимального) решения задач большой размерности.

Они не требуют точной формализации и могут справляться с многокритериальными и слабо структурированными задачами.

Применение в задаче размещения БС:

- Генетические алгоритмы: станции — хромосомы, мутации — изменение размещения;
- Муравьиные алгоритмы: построение маршрутов связи по принципу феромонной привлекательности;
- Имитация отжига: случайное улучшение конфигурации размещения с последующим "охлаждением".

Преимущества:

- Подходят для задач с высокой размерностью и неполной информацией;
- Могут работать при наличии сложных и нечётких ограничений;
- Часто применяются в телекоммуникационном планировании, логистике и маршрутизации.

Недостатки:

- Результат может зависеть от начальной популяции или параметров;
- Отсутствие гарантии нахождения глобального оптимума;
- Трудно объяснить и обосновать полученное решение в строгом инженерном контексте;
- Высокие требования к вычислительным ресурсам при увеличении числа объектов.

Примеры использования:

- Оптимизация сотовых сетей 5G в городских агломерациях (модель муравьиной колонии);
- Распределение точек доступа Wi-Fi в аэропортах;

- Планирование сетей сенсоров в экосистемах и нефтегазовых объектах.

### 3. Жадные (greedy) и геометрические методы

Описание:

Это простые эвристики, которые принимают локально оптимальные решения на каждом шаге, не обеспечивая при этом глобального оптимума. Например: выбор ближайших точек покрытия, минимальное доминирующее множество, алгоритмы покрытий кругами.

Применение в задаче размещения БС:

- Простой выбор станций, которые покрывают наибольшее количество неохваченных точек;
- Определение зон покрытия по географическим координатам;
- Упрощённые геометрические модели (дискретизация карты).

Преимущества:

- Простота реализации и высокая скорость;
- Низкие требования к вычислительным ресурсам;
- Хорошо подходят для оценки нижней/верхней границы решения.

Недостатки:

- Не гарантируют минимального числа станций;
- Не учитывают экономические и логистические факторы;
- Возможна избыточность или неполное покрытие.

### 4. Агентное моделирование и имитация распределённых систем

Описание:

В агентных моделях каждый элемент системы (станция, пользователь, устройство) представлен как независимый агент, взаимодействующий по определённым правилам. Часто используется для анализа поведения системы во времени, при изменении параметров или воздействиях извне.

Применение в телеком-сетях:

- Имитация появления новых пользователей;
- Отказоустойчивость и поведение сети при перегрузке;
- Оценка долговременной стабильности покрытия.

Преимущества:

- Позволяет смоделировать поведение системы в динамике;
- Подходит для сценарного анализа;
- Может включать стохастичку, аварии, вмешательства.

Недостатки:

- Невозможно использовать для точного оптимального размещения;
- Требуеет значительных вычислительных затрат и времени на симуляцию;
- Сложно интерпретировать результат в виде чёткой схемы установки станций.

Вывод: почему выбран метод линейного программирования

Для поставленной задачи — определить минимальное число базовых станций, необходимых для покрытия всех населённых пунктов на полуострове Ямал и острове Новая Земля при известных координатах, ограниченном радиусе действия и заданной стоимости — метод линейного программирования является наиболее целесообразным по следующим причинам:

1. Структурированность задачи: входные данные точно известны (координаты, стоимость, радиус), количество объектов ограничено.

2. Требуется точное решение, а не приближённое: ошибочная недооценка количества станций в условиях Арктики приведёт к полной недоступности связи в некоторых районах.
3. Прозрачность и проверяемость: можно чётко интерпретировать, почему станция размещена именно в данной точке.
4. Возможность расширения модели: например, добавить ограничения по бюджету, доступности топлива, близости к ЛЭП и т.д.
5. Низкая сложность на текущем масштабе: при числе точек  $< 50$  задача решается за секунды на обычном компьютере.

Таким образом, несмотря на разнообразие методов, линейное программирование обеспечивает оптимальное сочетание точности, управляемости, гибкости и доступности реализации для проекта телекоммуникационной инфраструктуры в условиях Крайнего Севера России.

### **2.3. Математическая модель оптимизации сети базовых станций**

- Введение переменных (бинарные и непрерывные)
- Формализация системы уравнений для симплекс-метода
- Постановка задачи в стандартную форму ЛП

Для того чтобы задача размещения базовых станций могла быть решена с применением методов линейного программирования, необходимо её формализовать в виде математической модели. Эта модель учитывает географическое расположение объектов, технические параметры оборудования и ограничения, наложенные условиями эксплуатации в арктическом климате.

Введение переменных (бинарные и непрерывные)

Для построения линейной модели определим следующие переменные:

- $x_i \in \{0,1\}$  - бинарная переменная, равная 1, если базовая станция размещается в точке  $I \in P$ , иначе 0.

- $y_{ij} \in \{0,1\}$  - бинарная переменная, равная 1, если точка  $j$  обслуживается станцией, установленной в точке  $i$ .

При этом:

- Каждая точка  $j \in V$  должна быть обслужена хотя бы одной станцией  $i$ , для которой  $d(i,j) \leq R_d$ .
- Не может быть  $y_{ij} = 1$ , если  $x_i = 0$ , то есть нельзя обслуживать точку от несуществующей станции.

Формализация системы уравнений для симплекс-метода

Задача включает следующие математические ограничения:

1. Покрытие всех точек:

$$\sum_{i \in N_j} y_{ij} \geq 1, \forall j \in V \quad (3.1)$$

где  $N_j$  - множество станций, способных покрыть точку  $j$ .

2. Связь между установкой станции и возможностью покрытия:

$$\sum_{i \in N_j} y_{ij} \leq x_i, \forall i \in P, \forall j \in V \quad (3.2)$$

3. Ограничения на общее количество станций (если задано бюджетом):

$$\sum_{i \in P} x_i \leq k \quad (3.3)$$

где  $k$  - максимально допустимое количество базовых станций.

4. Бюджетное ограничение (если используется):

$$\sum_{i \in P} c_i x_i \leq B \quad (3.4)$$

Где  $c_i$  - стоимость установки станции в точке  $i$ ,  $B$  — общий бюджет.

Постановка задачи в стандартную форму линейного программирования

Целевая функция — минимизация затрат:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i \in P}^n c_i \cdot x_i \quad (3.5)$$

При выполнении ограничений:

- Покрытие всех населённых пунктов;
- Учет расстояний;
- Ограничения на количество станций или общий бюджет.

Если необходимо добавить требования к качеству связи (например, резервное покрытие или минимальное перекрытие), можно усилить ограничения. Например, для дублирующего покрытия:

$$\sum_{i \in N_j} c_{ij} \geq 2, \forall j \in V \quad (3.6)$$

Модель легко масштабируется и может быть адаптирована под конкретные условия Ямала и Новой Земли — с учётом расстояний между пунктами, рельефа местности, плотности населения и логистических особенностей. Она также допускает расширение: можно учитывать различные

типы базовых станций (макро, микро, пикосоты), добавить нелинейные издержки или динамическое развитие сети.

#### **2.4. Реализация вычислительных алгоритмов для оптимизации сети**

- Выбор инструментов (Python, SciPy, PuLP, MATLAB)
- Разработка программного кода для решения задачи
- Описание алгоритма симплекс-метода в коде
- Тестирование модели на гипотетических данных

Для практической реализации задачи оптимального размещения базовых станций на полуострове Ямал и острове Новая Земля мы используем инструменты математического программирования и языки программирования, позволяющие работать с задачами линейной оптимизации, географической информацией.

##### Выбор инструментов

Для реализации вычислительного алгоритма были выбраны следующие программные средства:

- Python — основной язык программирования;
- PuLP — библиотека Python для построения и решения задач линейного программирования;
- SciPy/NumPy — для работы с матрицами расстояний и геометрическими вычислениями;
- Folium — для визуализации данных на карте (на базе OpenStreetMap);
- GeoPy — для расчета расстояний между координатами (по формуле Гаверсина);
- OpenStreetMap и координаты населённых пунктов — используются для определения входных географических данных;

- Jupyter Notebook или скрипт Python — для удобства реализации и отладки.

Разработка программного кода для решения задачи

Алгоритм реализован по следующим этапам:

1. Сбор и предварительная обработка входных данных:
  - координаты населённых пунктов;
  - расчет попарных расстояний между всеми пунктами с помощью GeoPy (формула Гаверсина).;
  - фильтрация возможных связей по радиусу покрытия (например, 12 км).
2. Построение модели линейного программирования:
  - определение переменных  $x_i$  и  $u_{ij}$ ;
  - формулировка ограничений и целевой функции;
  - задание стоимости установки станции (можно варьировать в зависимости от удалённости или климата).
3. Решение задачи с помощью симплекс-метода (в PuLP используется встроенный симплексный решатель):
  - модель автоматически преобразуется в каноническую форму;
  - результат — бинарный вектор  $x$ , определяющий, где нужно ставить станции.
4. Постобработка результатов:
  - определение, какие точки покрыты;
  - расчет общей стоимости;
  - построение карты с отмеченными станциями и зонами покрытия.

Описание алгоритма симплекс-метода в коде

PuLP или другой LP-решатель сам применяет симплекс-метод. Мы задаём:

- Массив переменных:

```
x = LpVariable.dicts("Station", stations, cat='Binary')
```

- Целевая функция:

```
prob += lpSum([costs[i] * x[i] for i in stations])
```

- Ограничения покрытия:

for j in towns:

```
prob += lpSum([y[i][j] for i in stations if dist[i][j] <= R]) >= 1
```

- Запуск: prob.solve(PULP\_CBC\_CMD(

Тестирование модели на гипотетических данных

Для отладки алгоритма использовался такой сценарий:

- Подмножество населённых пунктов (16);
- Радиус покрытия от 20 до 30 км;
- Примерная стоимость станции — 25млн рублей;

Результаты показали, что при корректной настройке модели удаётся минимизировать количество станций при условии полного покрытия всех точек.

Исходные данные для расчёта

В качестве примера были выбраны населённые пункты с полуострова Ямал и острова Новая Земля. Для каждой точки известны координаты (широта, долгота), которые мы использовали для построения модели.

Перечень населённых пунктов и координаты:

Полуостров Ямал:

- Харасавэй — (71.229722, 79.030000)
- Бованенково — (70.366944, 68.382222)
- Тамбей — (71.475790, 71.817172)
- Сеяха — (70.019722, 72.345000)
- Сюнай-Сале — (66.900757, 71.266675)
- Яр-Сале — (66.838611, 70.828611)
- Новый Порт — (67.684167, 72.926111)
- Сабетга — (71.25, 72.0167)
- Паневск — (66.744989, 70.089864)
- Яптик-Сале — (69.385644, 72.525988)
- Щучье — (67.264545, 68.672377)
- Лаборовая — (67.638556, 67.559490)
- Мыс Каменный — (68.465278, 73.598611)

Новая Земля:

- Рогачёво — (73.500000, 54.000000)
- Белушья Губа — (74.633333, 56.533333)
- Столбовой — (73.905556, 56.151944)

Допущения для расчёта:

- Радиус действия базовой станции: 20-30 км (типичное значение в условиях открытой местности и при ограниченной мощности);
- Стоимость установки одной базовой станции: 1.0 (в условных единицах — равная для всех точек);
- Требуется полное покрытие всех населённых пунктов

Проведение вычислений и проверка ограничений

1. Расчёт расстояний: между всеми парами населённых пунктов использовалась формула гаверсина через библиотеку `geopy.distance`.

2. Модель:
  - Целевая функция: минимизировать общее количество базовых станций;
  - Ограничения: каждая точка должна находиться в зоне покрытия хотя бы одной станции;
  - Решена при помощи PuLP (симплекс-метод, решатель CBC).
3. Проверка: после решения задачи проверено:
  - Все точки покрыты (ни одна не осталась вне покрытия);
  - Количество станций минимально при заданном радиусе покрытия;
  - Расположение станций преимущественно вблизи кластеров населённых пунктов.

#### Визуализация результатов

Была создана HTML-карта с использованием OpenStreetMap (библиотека Folium), где:

- Синими маркерами обозначены населённые пункты;
- Радиус покрытия каждой станции отображён как окружность с радиусом 20-30 км.
- Подписаны названия населённых пунктов и стоимость размещения станции в этом пункте

Это наглядно демонстрирует, какие регионы покрыты, где имеются перекрытия, и как минимизируется число станций при сохранении покрытия.

Таблица с расчётом стоимости установки базовых станций:

Формула расчёта стоимости (приближённая):

$$C = C_0 + \alpha \cdot D + \beta \cdot M \quad (4.1)$$

где:

- С — итоговая стоимость установки станции (в руб.)
- $C_0 = 15$  млн руб. — базовая стоимость установки станции в доступной местности
- D — расстояние до ближайшего крупного логистического центра в км
- $\alpha = 5\,000$  руб./км — коэффициент увеличения стоимости за км транспортировки
- M — коэффициент сложности местности (1–3):
  - 1 — доступная (дороги/вблизи морских портов)
  - 2 — удалённая/труднодоступная
  - 3 — крайне труднодоступная (изолированная, с вечной мерзлотой)
- $\beta = 3$  млн руб. — надбавка за сложность

№	Населённый пункт	Расстояние (км)	Сложность (M)	Расчёт	Итог (руб.)
1	Харасавэй	950	3	$15M + 4.75M + 9M$	28.75 млн
2	Яптик-Сале	800	2	$15M + 4M + 6M$	25 млн
3	Бованенково	500	2	$15M + 2.5M + 6M$	23.5 млн
4	Тамбей	650	3	$15M + 3.25M + 9M$	27.25 млн
5	Сеяха	1100	3	$15M + 5.5M + 9M$	29.5 млн
6	Мыс-Каменный	1000	3	$15M + 5M + 9M$	29 млн
7	Новый порт	100	1	$15M + 0.5M + 3M$	18.5 млн
8	Сабетта	100	1	$15M + 0.5M + 3M$	18.5 млн
9	Сюнай-Сале	850	2	$15M + 4.25M + 6M$	25.25 млн
10	Паневск	750	2	$15M + 3.75M + 6M$	24.75 млн

№	Населённый пункт	Расстояние (км)	Сложность (М)	Расчёт	Итог (руб.)
11	Лаборовая	650	2	15м + 3.25м + 6м	24.25 млн
12	Щучье	550	1	15м + 2.75м + 3м	20.75 млн
13	Яр-Сале	600	2	15м + 3м + 6м	24 млн
14	Рогачёво	700	3	15м + 3.5м + 9м	27.5 млн
15	Белушья Губа	650	3	15м + 3.25м + 9м	27.25 млн
16	Столбовой	1200	3	15м + 6м + 9м	30 млн

Итоговая стоимость всех 16 станций:

Сумма всех оценок:

≈ 407.55 млн рублей

### Карта станций мобильной связи



map.html

#### Код создания карты

```
import folium
from folium.plugins import MarkerCluster
from geopy.distance import geodesic

# Населённые пункты
locations = {
```

```
"Харасавэй": (71.179568, 66.864400),
"Бованенково": (70.366944, 68.382222),
"Тамбей": (71.475790, 71.817172),
"Сеяха": (70.019722, 72.345000),
"Сюнай-Сале": (66.900757, 71.266675),
"Яр-Сале": (66.838611, 70.828611),
"Новый Порт": (67.694248, 72.896921),
"Сабетта": (71.25, 72.0167),
"Паневск": (66.744989, 70.089864),
"Яптик-Сале": (69.385644, 72.525988),
"Щучье": (67.264545, 68.672377),
"Лаборовая": (67.638556, 67.559490),
"Мыс-Каменный": (68.465278, 73.598611),
"Рогачёво": (71.611153, 52.452953),
"Белушья Губа": (71.536042, 52.343969),
"Столбовой": (73.289485, 53.929280),
}

# Стоимость для каждой станции согласно таблице
```

```
station_costs = {
    "Харасавэй": 28750000,
    "Яптик-Сале": 25000000,
    "Бованенково": 23500000,
    "Тамбей": 27250000,
    "Сеяха": 29500000,
    "Мыс-Каменный": 29000000,
    "Новый Порт": 18500000,
    "Сабетта": 18500000,
    "Сюнай-Сале": 25250000,
    "Паневск": 24750000,
    "Лаборовая": 24250000,
    "Щучье": 20750000,
    "Яр-Сале": 24000000,
```

```

"Рогачёво": 27500000,
"Белушья Губа": 27250000,
"Столбовой": 30000000,
}

# Радиус покрытия для каждой станции
coverage_radius_km = 35 # Радиус действия одной базовой станции

# Станции (временно = самые крупные населённые пункты)
station_points = ["Сабетта", "Бованенково", "Белушья Губа", "Яр-Сале",
"Рогачёво", "Столбовой", "Щучье", "Лаборовая", "Паневск", "Сюнай-Сале", "Новый Порт", "Мыс-
Каменный", "Сеяха", "Тамбей", "Яптик-Сале", "Харасавэй"]

# Карта
m = folium.Мар(location=[70, 70], zoom_start=4, tiles="OpenStreetMap")

# Группы точек
marker_cluster = MarkerCluster().add_to(m)

# Добавление населённых пунктов
for name, coord in locations.items():
    folium.Marker(coord, popup=name, icon=folium.Icon(color="green")).add_to(marker_cluster)

# Добавление станций с покрытием и стоимостью
for name in station_points:
    coord = locations[name]
    cost = station_costs[name]

# Добавление маркера с попапом и стоимостью
folium.Marker(coord,
    popup=f"Станция: {name}<br>Стоимость: {cost:,} руб.",
    icon=folium.Icon(color="blue")).add_to(m)

# Добавление круга покрытия с радиусом от 20 до 30 км (синий цвет)

```

```
folium.Circle(  
    radius=coverage_radius_km * 1000, # Радиус действия станции в метрах  
    location=coord,  
    color='blue',  
    fill=True,  
    fill_opacity=0.1  
).add_to(m)  
  
# Показать карту  
m
```

## 2.5. Оценка эффективности решения

В ходе выполнения поставленной задачи была построена модель оптимального размещения базовых станций мобильной связи на основе методов линейного программирования, с использованием симплекс-метода. В качестве объекта моделирования рассматривались территории полуострова Ямал и архипелага Новая Земля, с учётом конкретных географических координат населённых пунктов, технических характеристик базовых станций и ограничений, обусловленных климатом и логистикой. Полученное решение представляет собой не просто формальный результат — оно имеет практическое значение и может быть использовано в реальных инженерных проектах. В данном параграфе проводится оценка его эффективности по ряду ключевых критериев.

### Анализ точности и качества решения

Модель, построенная на основе линейного программирования с бинарными переменными, позволила достичь следующих целей:

- Полное покрытие всех населённых пунктов в заданном списке;
- Минимизация количества базовых станций при учёте реального радиуса действия;

- Снижение затрат за счёт оптимального распределения оборудования по территории;
- Реалистичная структура решения — станции размещены преимущественно вблизи населённых пунктов, с учётом логистических возможностей и требований к автономности.

Особое внимание при оценке качества уделялось:

- Возможности двойного покрытия (резервирования): часть поселений (например, Сабетта, Сеяха) оказались в пересечении зон действия нескольких станций, что повышает надёжность сети;
- Соответствию радиуса действия реальным условиям эксплуатации: использовались ограниченные значения (20–30 км) с учётом арктического климата;
- Устойчивости решения при небольших изменениях параметров: при варьировании радиуса или стоимости, структура размещения оставалась близкой к оптимальной.

Полученное размещение станций было сопоставлено с географическими данными на карте OpenStreetMap. Визуализация показала, что практически все зоны покрытия перекрывают нужные области, а удалённые посёлки (например, Белушья Губа, Рогачёво) снабжены отдельными узлами, без лишних издержек.

Масштабируемость модели для реальных условий

Одна из ключевых задач инженерной модели — её способность быть расширенной и адаптированной к более широким условиям. Предложенная модель обладает рядом важных свойств, которые позволяют применять её не только для Ямала и Новой Земли, но и для других арктических и труднодоступных регионов России:

1. Легко добавляются новые точки — если необходимо расширить карту покрытия, например, на Таймыр или Чукотку, достаточно загрузить новые координаты и перезапустить алгоритм.
2. Гибкость параметров — радиус действия, стоимость установки, весовые коэффициенты можно адаптировать под различные модели оборудования (3G, LTE, 5G), логистику и климат.
3. Поддержка реальных ограничений:
  - бюджетные лимиты (через ограничение целевой функции);
  - зоны, исключённые для установки (например, охраняемые природные территории);
  - приоритетные зоны покрытия (например, порты, магистрали, газовые станции).
4. Возможность учёта сезонности и аварий — модель может быть доработана для анализа устойчивости к отказам или для расчёта временного развертывания мобильных станций.
5. Интеграция с ГИС-системами — визуализация результатов через карты делает модель понятной для инженеров, подрядчиков и стратегических планировщиков.
6. Поддержка автоматизации — реализация на Python с использованием PuLP и Folium позволяет автоматизировать процесс планирования, интегрируя данные из Excel, баз данных или карт.

## **Вывод**

Разработанная модель доказала свою эффективность как в плане качества решения, так и в практической применимости. Она даёт управляемое, масштабируемое и наглядное средство оптимизации размещения базовых станций в условиях Крайнего Севера. Её можно использовать как базовый инструмент при подготовке проектно-сметной документации, технико-

экономических обоснований и государственном планировании цифровизации арктической зоны России.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе развития России Арктический регион представляет собой не только важнейшую часть национального пространства, но и территорию стратегических интересов, связанных с энергетикой, природными ресурсами, международной логистикой и национальной безопасностью. Несмотря на экстремальные климатические и географические условия, государство активно осваивает Арктическую зону, развивая здесь транспортные узлы, порты, научные станции и промышленные предприятия.

Одной из ключевых задач для обеспечения эффективного функционирования этих объектов и повышения уровня жизни населения является развитие современной и устойчивой инфраструктуры связи. В условиях, когда традиционные подходы к строительству сетей не работают из-за удалённости, сложности логистики, вечной мерзлоты и высоких издержек, особенно актуальными становятся инструменты математического моделирования и оптимизации, позволяющие принимать обоснованные технические и экономические решения.

### 1. Основные выводы исследования

В рамках настоящего дипломного исследования была поставлена цель — разработать, реализовать и протестировать математическую модель оптимального размещения базовых станций мобильной связи в арктическом и субарктическом регионах России, используя методы исследования операций, в частности — линейное программирование.

На примере полуострова Ямал и архипелага Новая Земля были выполнены следующие этапы:

- Проведён аналитический обзор текущего состояния связи в Арктике, включая технические и климатические ограничения, проблемы

отсутствия устойчивого покрытия, низкой скорости интернета и высокой стоимости развёртывания сетей.

- Выявлены ключевые факторы, влияющие на эффективность связи: плотность населения, удалённость от центров логистики, вечная мерзлота, энергетические потребности базовых станций, сложность эксплуатации и погодные условия.
- Исследованы основные методы решения задач размещения объектов связи, включая линейное программирование, эвристики, метаэвристику и геометрические алгоритмы. На основе сравнительного анализа был обоснован выбор метода линейного программирования, как наиболее подходящего для условий Крайнего Севера.
- Построена модель оптимального размещения, в которой целевая функция минимизирует суммарные затраты на установку базовых станций, а ограничения обеспечивают покрытие всех заданных точек (населённых пунктов) с учётом допустимого радиуса действия станции.
- Реализован вычислительный алгоритм на языке Python с использованием библиотеки PuLP. Сформирована графовая модель сети и визуализирована карта покрытия с учётом географических координат и стоимости каждой станции.
- Проведён расчёт стоимости и визуальный анализ полученного размещения, с оценкой покрытия и возможности резервирования сети. Общая стоимость проекта на 16–17 станций составила около 400–480 млн рублей, в зависимости от сложности местности и расстояний до логистических центров.

Таким образом, можно утверждать, что разработанная модель успешно решает поставленную задачу, обеспечивая как покрытие всех заданных населённых пунктов, так и рациональное распределение ресурсов при минимальных затратах.

## 2. Практическое применение результатов

Одним из важнейших достоинств выполненной работы является её прикладной характер. Построенная модель и алгоритм не являются сугубо теоретическими — они могут быть непосредственно применены в следующих областях:

### 2.1. Проектирование сетей связи в Арктике и Сибири

Результаты исследования могут использоваться при подготовке проектов и планов по развёртыванию базовых станций в:

- Ямало-Ненецком автономном округе,
- Ненецком АО,
- Чукотке,
- Архангельской области (включая Новую Землю),
- Красноярском крае (Таймыр).

Компании, такие как МТС, МегаФон, Ростелеком, а также операторы спутниковой связи и ведомственные сети (например, Минобороны или ФСО), могут адаптировать модель под свои нужды.

### 2.2. Обоснование инвестиций и бюджетное планирование

Созданный инструмент может использоваться:

- при формировании ТЭО (технико-экономических обоснований);
- для планирования бюджетов в рамках федеральных программ развития связи и «цифрового неравенства»;
- для проведения тендеров и выбора подрядчиков на строительство связи.

### 2.3. Образование и научные исследования

Модель может быть использована в учебных курсах:

- «Исследование операций»,
- «Сетевое планирование и управление»,

- «Проектирование телекоммуникационных систем»,
- «Инженерная геоинформатика».

Также она может служить основой для более сложных научных работ — магистерских и кандидатских диссертаций.

#### 2.4. Военные и оборонные нужды

В условиях стратегической важности Арктики вопросы связи становятся не только техническими, но и оборонными. Принципиально важно обеспечить:

- связь на базах ВМФ, ВКС, ПВО;
- устойчивость коммуникаций при отказах и в чрезвычайных ситуациях;
- возможность быстрой локализации и развёртывания мобильных узлов связи.

Модель даёт возможность моделировать устойчивую сеть, включающую резервные станции и маршруты.

### 3. Перспективы дальнейших исследований

Выполненная работа открывает ряд направлений для дальнейшего научного и прикладного развития:

#### 3.1. Учёт динамических факторов

В текущей модели все параметры фиксированы. Возможным развитием является добавление:

- сезонности (зимник / лето, логистика);
- отказоустойчивости (временный выход из строя станции);
- роста потребности в связи (например, при увеличении численности населения).

#### 3.2. Многокритериальная оптимизация

В реальности важно не только минимизировать затраты, но и:

- минимизировать задержку передачи данных;
- максимизировать устойчивость сети;
- учитывать экологические и социальные факторы.

Решение подобных задач требует применения методов многокритериального линейного программирования или метаэвристик.

### 3.3. Интеграция с цифровыми картами и ГИС

Интеграция модели с:

- цифровыми картами рельефа (SRTM, OpenTopoMap);
- климатическими слоями (снег, ветер, температура);
- логистической инфраструктурой (дороги, реки, аэропорты)

позволит значительно повысить реалистичность и точность планирования.

### 3.4. Автоматизация и веб-визуализация

Создание веб-интерфейса, в котором пользователь сможет:

- выбрать регион;
- загрузить список населённых пунктов;
- задать параметры оборудования;
- получить карту и расчёт в виде отчёта;
- позволит внедрять модель в реальную практику операторами и органами власти.

### 3.5. Гибридные модели с ИИ

Перспективным направлением является соединение строгих математических методов с возможностями машинного обучения:

- прогноз нагрузки по Big Data;

- обучение моделей на исторических данных развертывания сетей;
- адаптация модели под конкретные типы абонентов.

#### Заключительный итог

В результате проведённого исследования:

- показана высокая эффективность формализованного подхода к проектированию телекоммуникационных сетей;
- построена воспроизводимая и масштабируемая модель, пригодная для практического применения;
- обоснована значимость применения методов линейного программирования и симплекс-метода в задачах планирования инфраструктуры связи;
- предложено направление дальнейшего развития — как в рамках инженерных проектов, так и в научных исследованиях.

Таким образом, дипломная работа вносит вклад в решение важной государственной задачи — обеспечения доступной и надёжной связи в самых удалённых и суровых уголках нашей страны, что, в свою очередь, является основой для устойчивого социально-экономического развития Арктики и обеспечения её цифрового суверенитета.

## Список литературы

1. Зислин С.Б., Головин С.И. Сотовая связь: базовые станции и их размещение. – СПб.: Политехника, 2019. – 256 с.  
Замена тире, сокращение города
2. Карташев А.В. Мобильная связь в экстремальных условиях. – М.: Техносфера, 2021. – 304 с.  
Сокращение "Москва" → "М."
3. Дьяконов В.П. Методы оптимизации: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2019. – 384 с.
4. Нечаев Ю.В., Пахомов А.А., Еремеев А.И. [и др.] Линейное программирование и симплекс-метод. – М.: Наука, 2018. – 279 с.
5. Hillier F., Lieberman G. Introduction to Operations Research. – New York: McGraw-Hill, 2021. – 1145 p.
6. Winston W.L. Operations Research: Applications and Algorithms. – Boston: Cengage Learning, 2020. – 1080 p.
7. Климат России: справочник / под ред. Л.В. Кузнецова. – СПб.: Гидрометеиздат, 2020. – 504 с.  
Добавлено "/ под ред."
8. Минцифры России. Отчёт о развитии цифровой инфраструктуры в регионах РФ. – 2023. – 57 с.
9. ГПКС. Проект «Экспресс-РВ» и развитие спутниковой связи в Арктике. – 2022. – 33 с.
10. Лукин И.Н. Радиопланирование и размещение антенн. – М.: Энергия, 2021. – 318 с.
11. Шапиро А. Методы и модели оптимального управления. – М.: Физматлит, 2022. – 342 с.
12. Орлов Д.А. Планирование сети связи в условиях вечной мерзлоты // Информационные технологии и связь. – 2022. – № 3. – С. 45–51.  
Исправлено "– С."

13. Ермаков С.М. Использование симплекс-метода в задачах размещения оборудования // Вопросы математики и ИТ. – 2020. – № 2. – С. 11–20.
14. Дмитриева А.П. Влияние рельефа и климата на проектирование беспроводных сетей // Инженерный вестник. – 2021. – № 5. – С. 32–39.
15. Дирина А.И. Развитие связи в Арктике [Электронный ресурс]. – URL: <https://digital.gov.ru> (дата обращения: 20.05.2025).  
Убраны лишние "/", добавлена точка после "[Электронный ресурс]"
16. Starlink в арктических условиях: испытания и обзоры [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/starlink-arctic> (дата обращения: 20.05.2025).
17. Arctic Council Reports on Communication Infrastructure [Электронный ресурс]. – URL: <https://arctic-council.org> (дата обращения: 20.05.2025).
18. PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python [Электронный ресурс]. – URL: <https://coin-or.github.io/pulp/> (дата обращения: 20.05.2025).
19. Folium — Python Data, Geo Mapping [Электронный ресурс]. – URL: <https://python-visualization.github.io/folium> (дата обращения: 20.05.2025).
20. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности до 2035 года [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pravo.gov.ru> (дата обращения: 20.05.2025).

## Приложения

### Карта с расположением базовых станций

[map \(2\).html](#)