



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Информационные технологии и системы безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Магистр)

На тему Исследование ледовых режимов арктических портов

Исполнитель Алексеева Анастасия Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор технических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Сикарев Игорь Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Коринец Екатерина Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
доктор технических наук
(ученая степень, ученое звание)
Бурлов Вячеслав Георгиевич
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 2025 г.

Санкт–Петербург
2025

Реферат

Выпускная квалификационная работа объёмом 102 страницы содержит 68 рисунков и 65 источников литературы.

Объект исследования - арктические порты, входящие в состав северного морского пути.

Предмет исследования – ледовый режим арктических портов.

Целью работы является исследование ледового режима арктических портов, на основе гидрологического анализа с использованием трёхмерной цифровой модели рельефа.

Задачи:

- Изучение современного состояния арктического региона;
- Изучение доступности данных дистанционного зондирования в арктическом регионе;
- Изучение климатических условий арктических портов, относящихся к северному морскому пути;
- Проведение сравнительного анализа арктических портов с последующим предоставлением рекомендаций по развитию портов;
- Создание цифровых моделей рельефа в районе арктических портов, демонстрация результатов и разработка практических рекомендаций.

В выпускной квалификационной работе произведено изучение современного состояния арктического региона, доступности данных дистанционного зондирования, климатических условий арктических портов, относящихся к северному морскому пути, выполнен сравнительный анализ арктических портов, с последующим предоставлением рекомендаций по развитию портов, были созданы цифровые модели рельефа в районе арктических портов, по которым были проведены гидрологические анализы, с демонстрацией полученных результатов.

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Современное состояние арктического региона.....	8
1.1 Климатические особенности Арктики	8
1.2 Обеспеченность арктического региона геоинформационными ресурсами	14
1.3 Особенности портовой инфраструктуры Арктики	25
Глава 2. Физико-географические особенности арктических портов России..	30
2.1 Географическое положение и климатические условия северного морского порта Архангельск	30
2.2 Географическое положение и климатические условия северного порта Сабетта	34
2.3 Географическое положение и климатические условия северного морского порта Диксон	37
2.4 Географическое положение и климатические условия северного морского порта Дудинка	40
2.5 Сравнительная характеристика арктических портов	42
Глава 3. Создание трёхмерной цифровой модели рельефа в районе арктических портов.....	47
3.1 Сбор данных для построение цифровой модели рельефа местности.....	47
3.2 Обработка исходных данных для создания цифровой модели рельефа	53
3.3 Создание макетов цифровой модели рельефа	63
3.4 Визуализация макетов, путём создания 3D моделей рельефа	70
3.5 Анализ полученных результатов.....	77
Заключение	94
Список используемых источников.....	96

Введение

Арктика — это обширная территория, которая находится вокруг Северного полюса и включает в себя воды Северного Ледовитого океана, а также прилегающие моря, острова и северные территории таких государств, как Россия, Канада, США (Аляска), Дания (Гренландия), Норвегия, Исландия, Швеция и Финляндия. Она отличается уникальными климатическими особенностями, характеризующимися экстремальными температурами, сезонными колебаниями и значительными последствиями изменения климата.

Арктика — это территория, которая особенно остро реагирует на глобальное потепление. Температура здесь растёт быстрее, чем в других регионах планеты. Это явление, которое называют «арктическим усилением», приводит к значительным изменениям.

К *основным последствиям* климатических изменений можно отнести:

- 1) Сокращение площади многолетних льдов. За последние 40 лет площадь морского льда в Арктике уменьшилась более чем на 40%;
- 2) Увеличение продолжительности безледного периода в некоторых районах. С 1979 года безледный период в некоторых районах увеличился на 2–3 месяца;
- 3) Дестабилизация вечной мерзлоты. Таяние вечной мерзлоты представляет угрозу для инфраструктуры, такой как трубопроводы, порты и города;
- 4) Усиление экстремальных погодных явлений. Наблюдается рост числа штормов, подвижек льда и айсберговой опасности.

Так же, отдельной категорией последствий климатических изменений можно выделить влияние ледовых условий на судовые аварии и экономику арктических портов.

Ледовые условия, как причина аварий судов:

В Арктике ситуация со льдом представляет серьёзную опасность для судоходства, приводя к авариям, которые могут иметь катастрофические последствия.

Примерами таких инцидентов служат:

- В 2013 году танкер «Норд» получил повреждения корпуса из-за сжатия льдов в Охотском море. Это привело к разливу нефтепродуктов;

- В 2021 году сухогруз «Спарта» сел на мель в Восточно-Сибирском море из-за сложной ледовой обстановки. Потребовалась длительная спасательная операция;

- В 2019 году атомный ледокол «Таймыр» столкнулся с айсбергом.

Это подтверждает, что ледовые условия становятся всё более непредсказуемыми.

К основным причинам аварий можно отнести:

- Динамические ледовые нагрузки — сжатие льдов может деформировать корпус судна;

- Столкновения с айсбергами и торосами — особенно опасны в условиях плохой видимости;

- Потеря управляемости — вязкие льды снижают маневренность, увеличивая риск посадки на мель;

- Ошибки в ледовой проводке — неверная оценка толщины льда или маршрута движения.

Влияние ледовых условий на экономику региона:

Ледовые условия оказывают значительное влияние на работу арктических портов, приводя к существенным экономическим потерям.

Во-первых, из-за ожидания ледокольной проводки в зимний период порты могут простаивать, что приводит к задержкам судов. В порту Дудинка, расположенном в России, навигация возможна только в течение 4–5 месяцев в году, а задержки из-за льдов увеличивают стоимость перевозок на 15–20%.

Во-вторых, ледокольное сопровождение судов требует значительных затрат. Стоимость одного рейса ледокола может достигать 1–2 миллионов долларов. Повреждённые ото льда суда требуют дорогостоящего ремонта.

Порты, относящиеся к Северному Морскому Пути, играют главную роль в логистике и экономике региона. Их непрерывная и бесперебойная работа напрямую зависит от окружающих факторов, в том числе, ледовых условиях.

Почему изучение ледовых режимов портов важно для науки?

1. Недостаток исследований. Большинство исследований сосредоточено на общих климатических тенденциях, а не на локальных условиях в портовых акваториях.
2. Практическая значимость. Понимание ледовой динамики позволяет:
 - прогнозировать периоды навигации;
 - оптимизировать работу ледоколов;
 - проектировать надёжную портовую инфраструктуру.
3. Новые вызовы. Из-за климатических изменений традиционные методы оценки ледовых нагрузок устаревают, требуются новые модели прогнозирования.

Представленные данные убедительно показывают, что ледовая обстановка продолжает оставаться основным источником опасности для судоходства в Арктике. Мониторинг ледовых условий и разработка стратегий адаптации становятся не только научной проблемой, но и экономической необходимостью для стабильного развития региона.

Актуальность данной работы заключается в том, что работа арктических портов зависит от ледовых условий, определяющих частоту их использования, требования к ледокольному сопровождению и безопасность судоходства. В условиях изменения климата и роста экономической активности в Арктике, изучение ледовых режимов портов становится особенно важным для оптимизации логистики, снижения рисков и повышения эффективности портовой инфраструктуры.

Целью работы является исследование ледового режима арктических

портов, на основе гидрологического анализа с использованием трёхмерной цифровой модели рельефа.

Для достижения поставленной цели решаются основные **задачи исследования:**

- Изучение современного состояния арктического региона;
- Изучение доступности данных дистанционного зондирования в арктическом регионе;
- Изучение климатических условий арктических портов, относящихся к северному морскому пути;
- Проведение сравнительного анализа арктических портов с последующим предоставлением рекомендаций по развитию портов;
- Создание цифровой модели рельефа местности в районе арктических портов, демонстрация полученных результатов и разработка практических рекомендаций;

Объект исследования – арктические порты, входящие в состав северного морского пути.

Предмет исследования – ледовый режим арктических портов.

Глава 1. Современное состояние арктического региона

1.1 Климатические особенности Арктики

Арктика — это полярный регион, примыкающий к Северному полюсу и простирающийся до северных побережий Евразии и Северной Америки. Арктическая зона входит в состав восьми государств (Канада, Дания, Финляндия, Исландия, Норвегия, Россия, Швеция и Соединённые Штаты). В свою очередь арктическая зона России составляет около 20 млн. км² и охватывает 9 регионов.

Арктическому климату характерны низкие температуры на протяжении всего года. Зимой столбик термометра может опускаться до -50°C , а летом в зависимости от региона воздух может прогреваться до $+20^{\circ}\text{C}$ и выше, однако, чем севернее, тем холоднее. Так, например, в летние месяцы на Северном полюсе столбик термометра держится на отметке около 0°C . Помимо этого, климату Арктики свойственны интенсивные ветра и высокая влажность.

Лето в Арктике довольно холодное, температура в среднем составляет $0-5^{\circ}\text{C}$. Максимальное значение в регионах — $+10-20^{\circ}\text{C}$ (иногда выше). Например, в Мурманске в 1972 г. рекордная температура воздуха летом была $+28,2^{\circ}\text{C}$, летом 2023 г. почти дотянула до этой отметки (разница составила лишь $2,4^{\circ}\text{C}$). Для сравнения, в Норильске средняя температура летом $+14,3^{\circ}\text{C}$.

В январе средняя температура воздуха составляет -22°C . В зависимости от географического положения территории, она может колебаться от -1 до -9°C , в самых холодных местах снижается до -40°C . Несмотря на суровые условия климата, снега в Арктике выпадает немного — порядка 50 см (среднегодовой уровень). Ветра поднимают снежную пыль, поэтому кажется, что в регионе постоянно идет снег.

В арктической зоне существуют понятия полярной ночи и полярного дня. Их продолжительность — 50-170 дней, в зависимости от местоположения конкретного региона. В период полярной ночи солнце не поднимается над горизонтом, поэтому регион испытывает недостаток тепла и света. Даже то

небольшое количество тепла, которое всё же поступает, отражается снегом и ледниками [18].

В последние годы в Арктике наблюдается значительное повышение температуры. В настоящее время потепление в этом регионе происходит более интенсивно, чем в других частях земного шара.

В 2023 году в Арктике было зафиксировано самое тёплое лето за всю историю наблюдений. В некоторых районах средняя температура превысила показатели 1991–2020 годов более чем на 4 градуса Цельсия.

2023 год также стал тревожным рубежом: с 1940 года среднегодовой рост температуры в Арктике составляет 0,25 градуса Цельсия за десятилетие.

Такое стремительное потепление — это не просто статистическое отклонение от нормы, а результат уникального взаимодействия различных факторов в Арктике.

Одним из ключевых факторов является альбедо — показатель отражательной способности поверхности. В арктическом ландшафте преобладают снег и лёд, которые имеют высокий уровень альбедо и отражают большую часть солнечного излучения обратно в космос.

Однако по мере повышения температуры и таяния льда и снега появляются более тёмные поверхности, такие как открытый океан и суша. Эти поверхности поглощают больше солнечной энергии, чем отражают, что приводит к дальнейшему потеплению — формируется самоподдерживающийся цикл.

Дополнительное тепло, поглощаемое Северным Ледовитым океаном, не только растапливает льды, но и нагревает окружающий воздух, ускоряя таяние вечной мерзлоты и ледников [16].

Площадь арктических морских льдов в декабре 2024 года в среднем составила 11,42 млн. км² — это самый низкий показатель за месяц по данным спутников (рис. 1.1.1). Пурпурная линия показывает среднюю площадь в период с 1981 по 2010 год для этого месяца.

Площадь в декабре была на 40000 км² меньше предыдущего рекордно низкого показателя, зафиксированного в 2016 году, и на 1,42 млн. км² меньше среднего показателя за период с 1981 по 2010 год.

К концу декабря площадь ледяного покрова в Гудзоновом заливе, а также у побережья Лабрадора остаётся значительно ниже среднего уровня, как и в ноябре. Площадь ледяного покрова также остаётся низкой в северной части Баренцева моря, что, скорее всего, связано с проникновением тёплых атлантических вод в регион и благоприятными условиями атмосферной циркуляции.



Рисунок 1.1.1 – Площадь арктических морских льдов на декабрь 2024 года [3]

В декабре температура воздуха на уровне 762 м над поверхностью была выше средней практически на всей территории Северного Ледовитого океана, и пространственная структура была очень похожа на ту, что наблюдалась в

ноябре (рис. 1.1.2 и 1.1.3). На рисунках 1.1.2 и 1.1.3 жёлтым и красным цветом обозначены температуры выше среднего, синим и фиолетовым — ниже среднего. Особенно примечательно продолжение заметной области потепления к северу от Канадского Арктического архипелага и Гренландии, где, как и в ноябре, температура была на 8°С выше средней. Менее заметной, но также заслуживающей внимания является область необычного потепления в восточной части Гудзонова залива, где морской лёд ещё не сформировался. Эта особенность проявляется в больших потоках тепла и влаги из открытой воды в атмосферу.

Arctic Air Temperature Difference From Average, December 2024

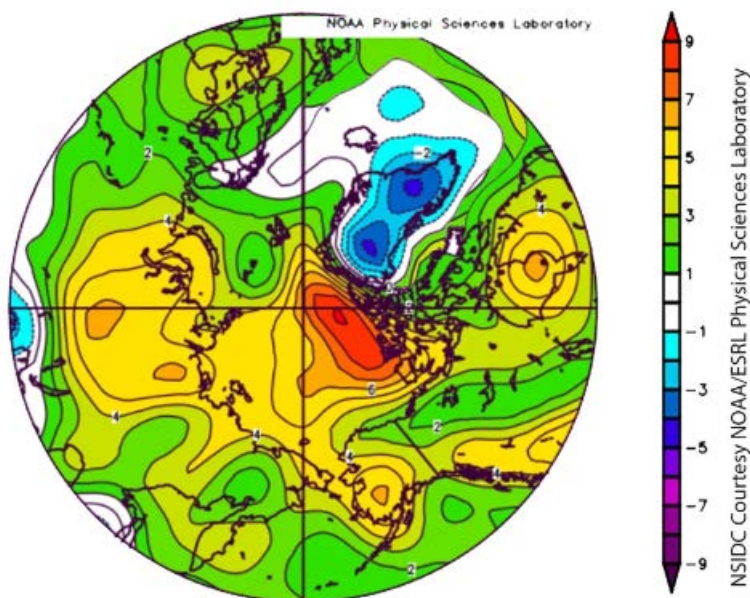


Рисунок 1.1.2 - Отклонение от средней температуры воздуха в Арктике на уровне 762 м в градусах Цельсия за декабрь 2024 года [62]

Arctic Air Temperature Difference From Average, November 2024

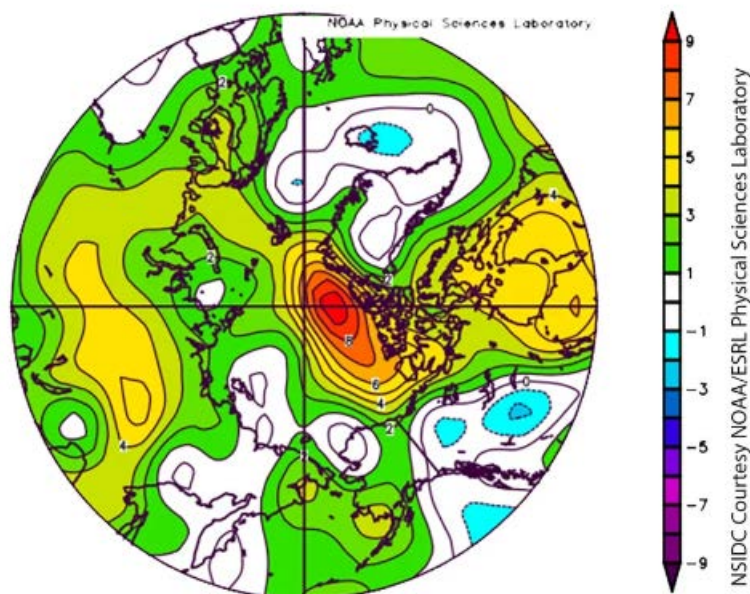


Рисунок 1.1.3 - Отклонение от средней температуры воздуха в Арктике на уровне 762 м в градусах Цельсия за ноябрь 2024 года [62]

По крайней мере, в качественном смысле такое постоянство кажется необычным. Учитывая, что региональные температурные режимы в значительной степени определяются региональными режимами атмосферной циркуляции, режимы давления на уровне моря в эти два месяца также были очень похожи. Оба месяца характеризовались сильными центрами низкого давления над Атлантическим и Тихим океанами в Арктике, а также гребнем относительно высокого давления, простиравшимся через Чукотское море и море Бофорта (рис. 1.1.4 и 1.1.5). На рисунках 1.1.4 и 1.1.5 жёлтым и красным цветом обозначено высокое давление воздуха, синим и фиолетовым — низкое. Однако неясно, как эти закономерности связаны с устойчивой полосой аномального потепления к северу от Канадского Арктического архипелага и Гренландии.

Average Sea Level Pressure December 2024

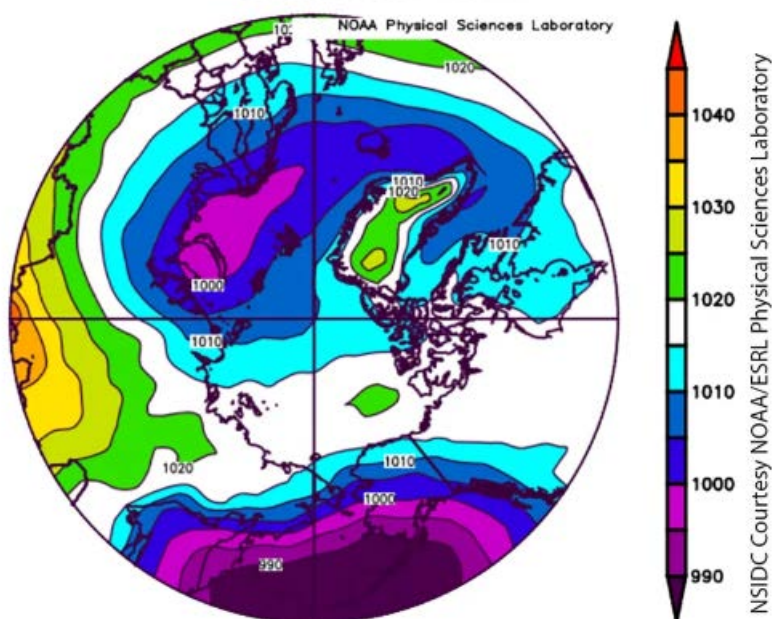


Рисунок 1.1.4 – Среднее давление на уровне моря в Арктике в миллибарах за декабрь 2024 года [62]

Average Sea Level Pressure November 2024

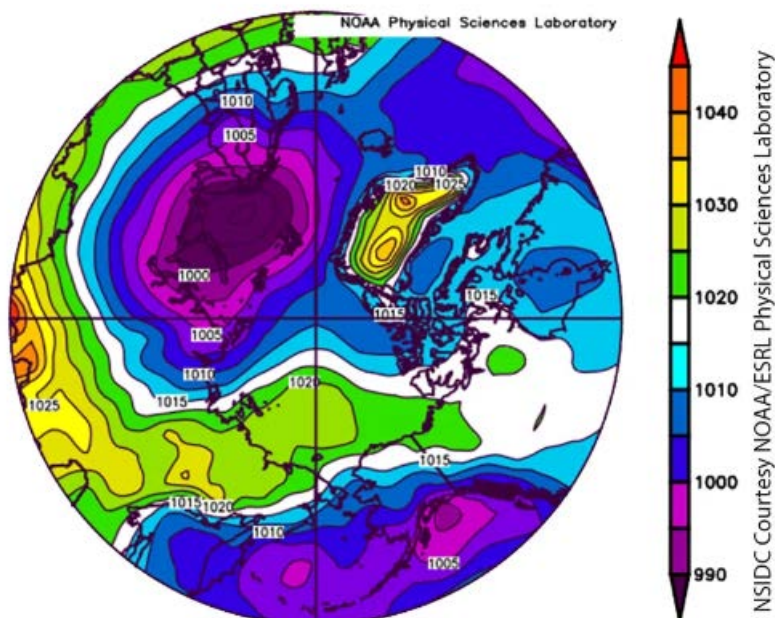


Рисунок 1.1.5 - Среднее давление на уровне моря в Арктике в миллибарах за ноябрь 2024 года [62]

1.2 Обеспеченность арктического региона геоинформационными ресурсами

Доступность географических информационных ресурсов в Арктическом регионе становится все более важной для мониторинга экологических изменений и поддержки устойчивого развития. Различные геоинформационные технологии, включая географические информационные системы (ГИС) и дистанционное зондирование, используются для улучшения доступности данных и процессов принятия решений в этой чувствительной области. К ключевым аспектам этих ресурсов можно отнести:

- Дистанционное зондирование:

Для изучения береговой линии Арктики используются различные наборы данных дистанционного зондирования Земли. В числе наиболее востребованных массивов данных дистанционного зондирования Земли можно выделить оптические спутниковые данные, полученные с таких аппаратов, как Landsat (5, 8 и 9), Sentinel-2, а также снимки, сделанные с помощью прибора MODIS, и ортофотопланы, созданные с использованием воздушных судов или беспилотных летательных аппаратов [53]. Несмотря на то, что существует множество оптических датчиков, предоставляющих важную информацию об этом регионе, на оптические данные сильно влияет облачный покров, который считается высоким для Арктической зоны, что препятствует их широкому использованию. В связи с этим в последнее время большое внимание уделяется радиолокационным снимкам, а данные Sentinel-1 также часто используются для мониторинга береговой линии в приполярной Арктике [61]. Ожидается, что новые спутниковые миссии, ориентированные на Арктическую зону, такие как CryoSat-2, предоставят беспрецедентные по масштабу данные, отражающие пространственные и временные закономерности таяния льдов, что улучшит наше понимание физических процессов, происходящих в этом регионе [58].

Кроме того, наряду с увеличением объёма самих изображений, полученных с помощью спутников, наблюдается рост числа производных наборов данных. Характерным примером такого набора данных является набор данных «Динамика прибрежных зон Арктики», измеряющий скорость эрозии в циркумполярной арктической зоне [59]. Параллельно создаются геопорталы и платформы WebGIS, на которых размещаются эти наборы данных, представляющие данные и предоставляющие пользователям возможность взаимодействия. Национальный центр данных о снеге и льду, входящий в состав Кооперативного института исследований в области наук об окружающей среде (CIRES) при Университете Колорадо в Боулдере, является важным центром распространения наборов данных, связанных с Арктикой, на основе данных дистанционного зондирования. Другим важным центром распространения данных является Норвежский полярный институт.

Поскольку постоянно запускаются новые спутниковые миссии с беспрецедентными возможностями спектрального и пространственного разрешения, технология дистанционного зондирования сможет предоставлять более полезную информацию о состоянии арктической зоны, способствуя гораздо лучшему пониманию динамики прибрежных районов Арктики. Однако возросший объем данных и отсутствие единой отправной точки для организации наборов данных представляют собой серьезные проблемы. ЕС (Европейский Союз), признавая ключевую глобальную роль изменений в вечной мерзлоте в устойчивом развитии и климате, профинансировал несколько платформ на основе данных дистанционного зондирования и облачных технологий (например, Permafrost CCI, Globpermafrost, APGC) для поддержки исследований, связанных с Арктикой. Однако информация, предоставляемая в рамках вышеупомянутых инициатив, в настоящее время распространяется через несколько веб-платформ, а открытые наборы данных, предоставляемые этими платформами, доступны в различных форматах, что затрудняет их использование, а в некоторых случаях делает его нецелесообразным [60].

К методам дистанционного зондирования можно отнести:

Спутниковый мониторинг:

Для спутникового мониторинга СМП используются спутники, оснащенные оптико-электронными приборами, радиолокаторами, способными получать высококачественные изображения и данные о ледовых образованиях, а также метеорологическими датчиками, позволяющие получать данные о температуре и погодных условиях.

Мониторинг в оптическом диапазоне.

Оптический диапазон состоит из края ультрафиолетового (УФ), видимого, инфракрасного (ИК) диапазонов длин волн. Большинство космических аппаратов (КА) ведет съемку в видимом и ближнем ИК диапазоне, так как человеческий глаз способен воспринимать изображения в видимом диапазоне, а ИК является полезным инструментом при анализе не только покрова льда, но и других объектов. Диапазон длин волн оптического спектра примерно составляет от 400 нм (фиолетовый) до 700 нм (красный), хотя это может варьироваться в зависимости от конкретных приборов и сенсоров

Некоторые российские спутниковые системы, такие как "Арктика-М" и "Ресурс-П", оснащены оптическими и инфракрасными сенсорами, которые обеспечивают возможность наблюдения за ледовым покровом, облачностью и другими атмосферными параметрами.

С помощью оптических сенсоров, установленных на спутниках, получают изображения высокого разрешения (1-10 м), благодаря которым определяется тип льда (открытая вода, тонкий лёд, многолетний лёд и т.д.). Оптические сенсоры, так же способны определять айсберги и ледяные горбы, что является важным аспектом для безопасной навигации судоходства. А благодаря инфракрасным сенсорам можно различить разные температурные зоны на ледовом покрове.

Благодаря оптическим сенсорам и инфракрасным датчикам, установленных на спутниках, можно отслеживать перемещение льда. Для

арктических морей это играет важную роль, так как можно прогнозировать и предотвращать столкновения судов со льдом.

Радиолокационный мониторинг:

Радиолокационные системы используются для наблюдения за ледовыми образованиями на поверхности СМП. Они работают на основе принципа эхолокации, излучая электромагнитные волны в радиодиапазоне и регистрируя отраженный сигнал от льда и водной поверхности. Метод основан на разделении РЛ-сигналов, отраженных от участков открытой водной поверхности и начальных видов льда в разрывах, и сигналов, отраженных от полей однолетнего и многолетнего льдов. Толщина льда вычисляется по его возвышению на основе уравнения гидростатического равновесия. При этом используются фиксированные значения плотности морской воды и льда. Отличительной особенностью радиоволн является прохождение их через облачность.

Радиочастотные диапазоны:

- X-диапазон: от 2,4 до 3,75 см (от 12,5 до 8 ГГц). Данные этого диапазона широко используются для решения задач военной разведки и для решения широкого ряда гражданских задач. Обладает высоким разрешением на местности (до 1 м) за счет небольшой (относительно других диапазонов) длины волны, но меньшем охватом территории. Из-за этого же свойства длины волны широко используется в метеорологии, эти радары более чувствительны к туману и облакам, состоящим из мельчайших капель воды, а также используются для обнаружения снежных осадков и зон неинтенсивного дождя, однако из-за низкой проникающей способности (Рис.2) меньше подходит для мониторинга ледяной толщи. Радиолокаторы этого диапазон используются на КА TerraSAR-X, TanDEM-X и CosmoSkyMed-1,2,3,4 и будет использоваться аппаратом Обзор-Р ((запуск запланирован на 2024г));

- С-диапазон: от 3,75 до 7,5 см (от 8 до 4 ГГц). Данные этого диапазона находят наиболее широкое применение для решения мониторинга льда. Из-за своей доступности данных и широкой применимости, этот метод является

наиболее универсальным и часто используется как в исследованиях, так и в практической деятельности. Радиолокаторы этого диапазона используются на КА ERS-1, ERS-2, ENVISAT, Radarsat-1 и Radarsat-2, Sentinel-1A и др.;

- S-диапазон: от 7,5 до 15 см (от 4 до 2 ГГц). По сравнению с X-диапазоном, S-диапазон чаще используется в радарх обнаружения на дальних расстояниях. В РФ имеется большой опыт по созданию спутников с данным диапазоном. Радиолокатор этого диапазона использовался на КА Алмаз и Кондор-ФКА;

- L-диапазон: от 15 до 30 см (от 2 до 1 ГГц). Просвечивает растительность, в том числе не слишком плотный лес. Излучение данного диапазона может частично (на глубину до нескольких метров) проникать в сухой снег, молодой лед, в сухую почву. Использован на КА SEASAT, JERS-1, ALOS PALSAR и др.;

- P-диапазон: от 30 до 100 см (от 1 до 0,3 ГГц). Просвечивает растительность (в том числе, плотную), используются для оценки биомассы, просвечивает сухую почву, сухой снег, лед на глубину до нескольких метров. Реализован на авиа-носителях.

Проникающая способность радиолокационных лучей увеличивается с возрастанием длины волны (рисунок 1.2.1);

Радары с длиной волны более 2 см просвечивают облачность, но при этом дождь и снег являются серьезным осложняющим фактором для РСА-систем с длинами волн до 4 см.

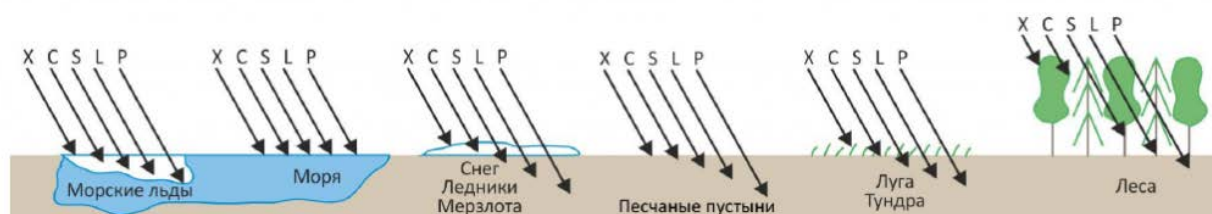


Рисунок 1.2.1 - Проникающая способность волн в зависимости от диапазона [27]

Поляризация сигнала:

Поляризация — это направленность вектора электрической составляющей электромагнитной волны в пространстве. Параллельная горизонтальная (HH) поляризация ориентирована горизонтально относительно поверхности, а вертикальная поляризация (VV) – вертикально (рисунок 1.2.2). Обычно для мониторинга ледяного покрова используется горизонтальная поляризация, поскольку она обеспечивает лучшую чувствительность к свойствам льда и имеет меньший уровень помех от других источников сигнала, а для мониторинга водной поверхности используется вертикальная.

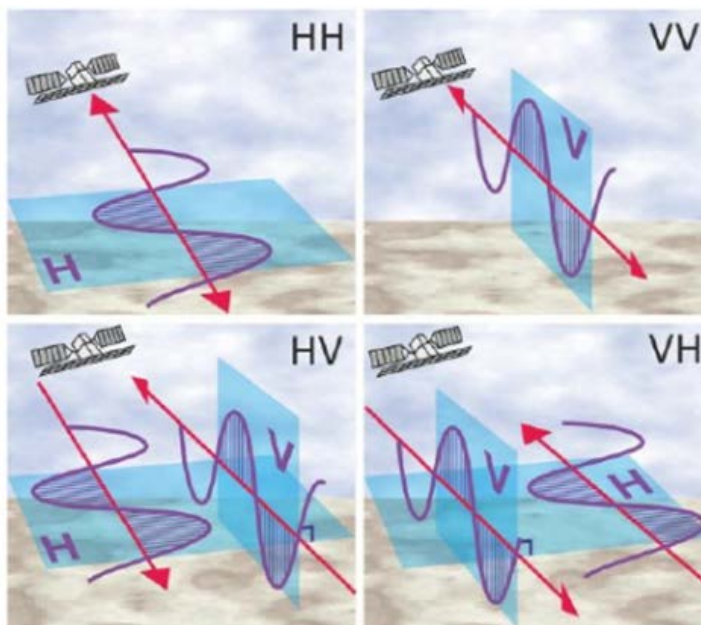


Рисунок 1.2.2 – Поляризация сигнала [27]

Также существует кроссполяризации VH и HV. В таком случае облучение поверхности происходит в одной поляризации, а принимается отраженный сигнал в другой. Из-за сильного отражения от морской поверхности, близкого по уровню к отражению от суши, суда обнаруживаются только на перекрестной HV поляризации (рисунок 1.2.3).

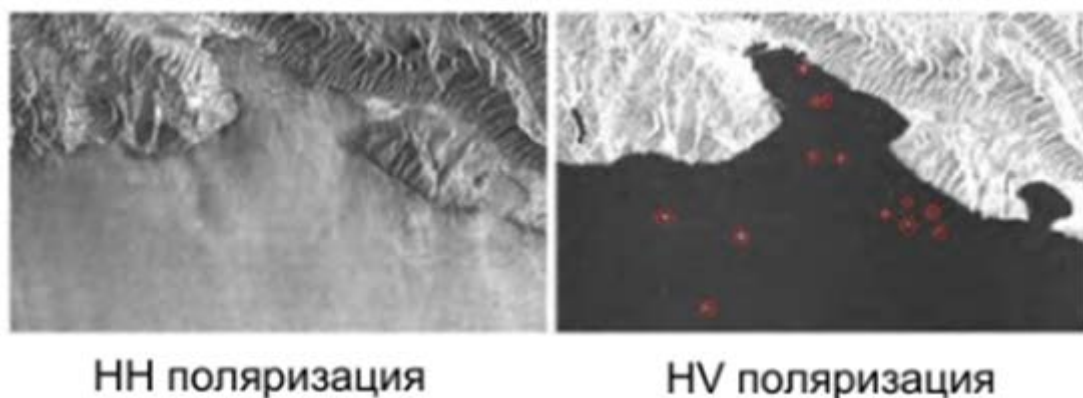


Рисунок 1.2.3 - Изображение судов на радиолокационных снимках с HH поляризацией и HV [27]

При мониторинге ледяного покрова ключевое у КА это поляризация, он обязательно должен иметь HH и HV, в идеале же иметь все 4 поляризации, для мониторинга. Эти данные позволяют создавать карты ледовых условий с нанесением опасных зон, а также определять безопасные и доступные маршруты для судов, проходящих по СМП.

Метеорологические системы мониторинга.

Для метеорологического мониторинга СМП установлены метеорологические станции и буи, но в основном используется космические комплексы, такие как «Метеор-М», группировка спутников, состоящая из 4 аппаратов по состоянию на 2023г, и «Арктика-М». На спутниках установлены датчики, которые могут измерять метеорологические условия (температура воздуха и воды, скорость и направление ветра, влажность, давление).

Информация, которую передают станции, поступает в центры мониторинга, после чего, она обрабатывается и изучается.

Корабельное наблюдение

Корабли, включая специализированные исследовательские суда и ледоколы, играют важную роль в мониторинге Северного морского пути. Они проводят наблюдения на месте, изучают ледяные образования, фиксируют изменения ледового покрова и собирают данные о погоде и морских условиях. Они оснащенные радаром, радиолокаторами и другими датчиками,

обеспечивают информацию о ледовых условиях, помогая определить безопасные маршруты и подтверждая данные, полученные с других источников.

Также уже сейчас существуют корабельные дроны. Инженеры из СПО «Арктика» и ПО «Севмаш» создали опытный образец судового дрона, который умеет приводняться и садиться на палубу (рисунок 1.2.4). Этот дрон рассчитан на выполнение многих задач в условиях арктических морозов.

Дрон может контролировать состояние судна, мониторить окружающую среду, передавать данные или груза, искать и спасать людей, служить в роли навигационного буя. Для выполнения всех этих задач дрон снабжен всей необходимой аппаратурой. Плавучесть аппарата обеспечивается за счет множества пустот в композитном корпусе дрона.

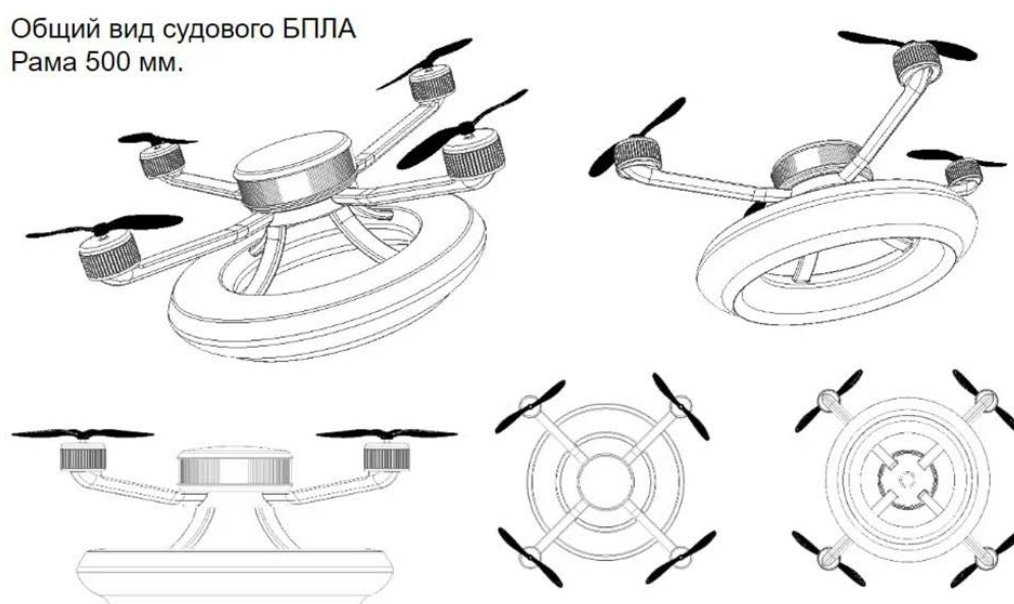


Рисунок 1.2.4 - Разработанный БПЛА для мониторинга, расположенный на борту судов [27]

В 2023 г. впервые в мире были проведены испытания беспилотника с палубы атомного ледокола Таймыр (рисунок 1.2.5). БПЛА выполнил полет по заданной траектории и провел визуальную и радиолокационную съемку арктической акватории.

Комплекс включает БПЛА вертикального взлета и посадки с гибридной силовой установкой, оснащенный оптико-электронной системой, радиолокатором бокового обзора и бортовым спецвычислителем. Также его укомплектовали ПО для работы с алгоритмами построения и распознавания изображений. В рамках полевых испытаний беспилотник провел два маршрутных полета.

На следующем этапе разработки специалисты запланировали внедрение системы полностью автоматизированной посадки на палубу без участия оператора, после чего предстоят повторные испытания в естественной среде с посадкой на ледокол в движении при качке.



Рисунок 1.2.5 - БПЛА на борту атомного ледокола Таймыр [27]

Его уникальность — в применении современных численных методов и алгоритмов для синтеза и автофокусировки радиолокационных изображений высокого разрешения на борту легкого БПЛА. Комплекс оперативной воздушной ледовой разведки — один из составных элементов создаваемой цифровой экосистемы Севморпути.

Все эти методы имеют свои отличительные особенности и преимущества. Однако на практике чаще всего одним методом не обойтись и используют так называемый комбинированный метод мониторинга.

- Арктический портал:

Арктический портал — это географическая информационная система (ГИС), которая позволяет отслеживать и прогнозировать состояние и изменения в системе «океан-атмосфера-криосфера» в Арктическом регионе. Для этого используются спутниковые и модельные данные.

С помощью спутниковых данных можно получить информацию о состоянии ледяного покрова на карте.

Арктический портал, разработанный в лаборатории спутниковой океанографии РГГМУ, представляет собой веб-приложение, которое можно использовать с любого современного веб-браузера. Портал позволяет работать с данными разного пространственного и временного разрешения. Часть данных доступна для просмотра в архивном режиме, но основная задача портала — оперативный мониторинг состояния Арктики.

Поскольку портал использует данные из сторонних источников, его оперативность ограничена временем появления данных на сайтах этих источников.

В настоящее время портал использует следующие типы данных дистанционного зондирования для изучения морского льда:

- Данные РСА Sentinel-1 A/B с высоким пространственным разрешением.
- Оптические карты MODIS с разрешением 500 метров, обновляемые каждые восемь дней.
- Оптические и инфракрасные снимки MODIS с разрешением 1 километр для видимых изображений и 250 метров для инфракрасных.
- Карты морского льда Норвежского метеорологического института для морей Северо-Атлантического бассейна.

- Среднесуточный продукт Университета Бремена по сплочённости морского льда по данным AMSR-E и AMSR2 с разрешением 6,25 километров.

- Среднесуточный продукт ЛСО по сплочённости морского льда по данным AMSR2 с разрешением 3 на 3 километра.

В тестовом режиме — продукт ЛСО по классификации морской поверхности по типу лёд/вода на основе данных PCA Sentinel-1 A/B.

Как и любой веб-сервис, портал состоит из программы, которая обеспечивает работу пользовательского интерфейса и программ для работы с данными. Для этого используются библиотеки и OpenLayers (версия 4.6.5), React (версия 16.1), Flask, а также программные платформы Nide.js, Python и PostgreSQL.

Вся система работы с данными полностью автоматизирована, начиная с загрузки данных и заканчивая отображением полей геофизических параметров или спутниковых измерений на портале.

Данные загружаются и обрабатываются специальными программами-обработчиками, которые зависят от типа данных. Обработка данных может включать в себя проецирование в полярную стереографическую проекцию — одну из наиболее удобных картографических проекций для изображения всего региона Арктики. Также могут применяться различные алгоритмы для обработки спутниковых данных уровня Level 1, которые реализуют как общеизвестные методы восстановления геофизических параметров, так и оригинальные, разработанные в ЛСО.

Помимо отображения выбранных продуктов на карте, портал позволяет работать с данными. В частности, можно настраивать визуальное представление данных — выбирать цветовую схему и диапазон шкалы для каждого снимка или всего продукта. Также можно изменять прозрачность слоёв и порядок их наложения, настраивать вид карты, добавлять маску суши и карту глубин.

На карту можно наносить (и при желании сохранять) различные объекты — отмечать интересные точки или области для последующей работы,

например, для визуального анализа дрейфа льда или оценки характеристик полыньи, разломов во льду и т. д. Можно посмотреть значение отображаемой величины и координату точки под курсором, построить график изменения величины вдоль сечения.

Для каждого набора данных, размещённого на платформе, предоставляется детальная информация: пространственное разрешение, время съёмки, доступные каналы измерений и другие параметры.

Помимо работы с данными в браузере, зарегистрированные пользователи могут экспортировать данные, указав нужную дату и регион. Также есть возможность запустить обработку архивных данных для выбранной даты и региона. Статус выполнения задачи можно отслеживать через веб-интерфейс.

После завершения обработки данные становятся доступны на портале для просмотра и скачивания.

Платформа также даёт возможность создавать базы данных с информацией об идентифицированных объектах, отслеживать изменения в различных типах и формах морского льда, его перемещение, оценивать проходимость ледяного покрова и т. д. Все эти инструменты делают изучение состояния и изменений ледяного покрова более удобным.

1.3 Особенности портовой инфраструктуры Арктики

В Арктическом регионе расположено девятнадцать российских портов, которые занимаются перевалкой внешнеторговых и внутренних грузов. Эти порты можно разделить на три категории. Первая группа включает Мурманск, Архангельск, Витино и Кандалакшу, которые имеют железнодорожное сообщение с основной транспортной сетью страны. На эти четыре порта приходится 85,4% грузов, проходящих через Арктический бассейн. Вторая группа состоит из портов, обслуживающих интересы одной компании, таких как Варандей и Дудинка. Третья группа включает оставшиеся четырнадцать

портов, которые находятся в удаленных районах без сухопутного сообщения и обеспечивают снабжение местных населенных пунктов. Их загрузка составляет от 5% до 50%, и перспективы увеличения грузооборота отсутствуют.

Все порты Арктического бассейна, за исключением Мурманска, большую часть года работают при низких температурах и ледяном покрове. Для их функционирования необходимы ледоколы, а доставка грузов осуществляется под проводкой линейных ледоколов, включая атомные.

Через арктические порты осуществляется «северный завоз» — грузы, необходимые для жизни коренных народов Севера и освоения природных ресурсов северных территорий.

Еще одной важной функцией арктических портов является обслуживание Северного морского пути (СМП), который может столкнуться с серьезными трудностями при увеличении объема международных транзитных перевозок по этому маршруту [34].

СМП – один из самых значимых и уникальных мировых маршрутов. Это кратчайшее расстояние от Европы до Дальнего Востока. (рис. 1.3.1)

По официальным данным своё начало СМП берёт в Мурманске. Поворотным пунктом после движения вдоль Западной и Восточной Сибири становится Чукотка. Конечная точка – Владивосток, до которого судна доплывают через Берингов пролив. Остановки во время экспедиции предусмотрены и осуществляются в крупных портах:

- Нарьян-Мар, находящийся в 70 милях от устья реки Печора;
- Дудинка – расположен на правом берегу реки Енисей;
- Диксон – на побережье Карского моря у входа в Енисейский залив;
- Игарка – берег Игарской протоки Енисея;
- Певек – в Чаунской губе Восточно-Сибирского моря;
- Тикси – побережье моря Лаптевых

Выгода по километражу очевидна. Однако в связи с климатическими особенностями маршрута, туристические круизы и экспедиции курсируют

лишь дважды в год, на протяжении 2-4 месяцев, преимущественно в летнее время. Для беспрепятственного прохода судов на протяжении всех 12 месяцев через льды используются атомные ледоколы, но их строительство обходится слишком дорого [15].



Рисунок 1.3.1. – Северный Морской Путь [40]

По плану развития, утвержденному правительством России, провозная способность СМП должна увеличиться до 100 млн.т. к 2026 году и к 2030 году до 200 млн.т [47]. На таблице 1.3.1 представлена провозная способность СМП в период с 2021 года по 2024 год.

Таблица 1.3.1 – Грузооборот СМП (2021 - 2024 г.г.)¹

	2021 год	2022 год	2023 год	2024 год
Общий грузооборот	34,85 млн. т.	33,9 млн. т.	36 млн. т.	37,9 млн. т.

По данным, представленным в таблице 1.3.1 можно сделать вывод, что провозная способность СМП увеличивается из года в год, но вряд ли достигнет уровня в 100 млн,т. к 2026 году. Хотя, правительство России серьёзно

¹ Таблица создана автором по данным, полученным в ходе исследования

относится к данному вопросу и принимает все возможные действия для достижения поставленных результатов. Таким образом, Объем инвестиций в реализацию плана до 2035 года составит 1,8 трлн рублей. Инвестиции государства защищены соглашениями между компаниями, реализующими проекты в Арктике, и Минвостокразвития.

План предусматривает формирование грузовой базы, в частности привлечение новых грузопотоков, развитие каботажной линии и транзитных перевозок, а также увеличение количества рейсов.

Будет создана наземная транспортная инфраструктура. От Мурманска до Владивостока создаются и модернизируются 14 портов и терминалов, вводятся новые перевалочные терминалы для СПГ (сжиженный природный газ), угля и удобрений.

Утверждены планы-графики создания нового ледокольного и транспортного флота ледового класса в количестве 153 судов. Судостроительная отрасль успешно преодолевает вызовы, связанные с замещением иностранных технологий.

Обеспечение безопасности судоходства по СМП включает новую спутниковую группировку, развитие гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, аварийно-спасательной и медицинской инфраструктуры.

Основные полномочия по управлению судоходством по СМП переданы «Росатому». Совместно с правительством компания создает единую экосистему, удобную для всех участников СМП.

Развитие внутренних перевозок по СМП позволит повысить эффективность снабжения северных регионов, сделать доставку товаров на Север быстрее и надежнее [40].

Не маловажную роль в вопросе развития СМП играет инфраструктура портов.

Портовая инфраструктура арктических портов характеризуется уникальными проблемами и возможностями, обусловленными их

географическими и климатическими условиями. Развитие этих портов имеет решающее значение для расширения торговых путей, в частности через Северный морской путь (СМП). Ключевые аспекты арктической портовой инфраструктуры включают экологические соображения, технологический прогресс и логистические проблемы.

Выводы по главе: в рамках первой главы выпускной квалификационной работы было изучено современное состояние арктического региона, доступность данных дистанционного зондирования в арктическом регионе и особенность портовой инфраструктуры в Арктике.

Глава 2. Физико-географические особенности арктических портов России

2.1 Географическое положение и климатические условия северного морского порта Архангельск

Порт Архангельск — крупный морской порт, расположенный в устье реки Северная Двина, примерно в 50 километрах от Двинской губы Белого моря (см. рисунок 2.1.1).

Этот порт играет ключевую роль в каботажных перевозках между районами Русского Севера. Он является главным транспортным узлом Архангельска. Благодаря своему удачному расположению, порт обеспечивает прямой доступ к Мировому океану как через западные, так и восточные маршруты, без ограничений, связанных с прохождением проливов. В отличие от других портов Северо-Западного региона России, порт Архангельск обладает значительными резервами портовых мощностей и развитой железнодорожной инфраструктурой.

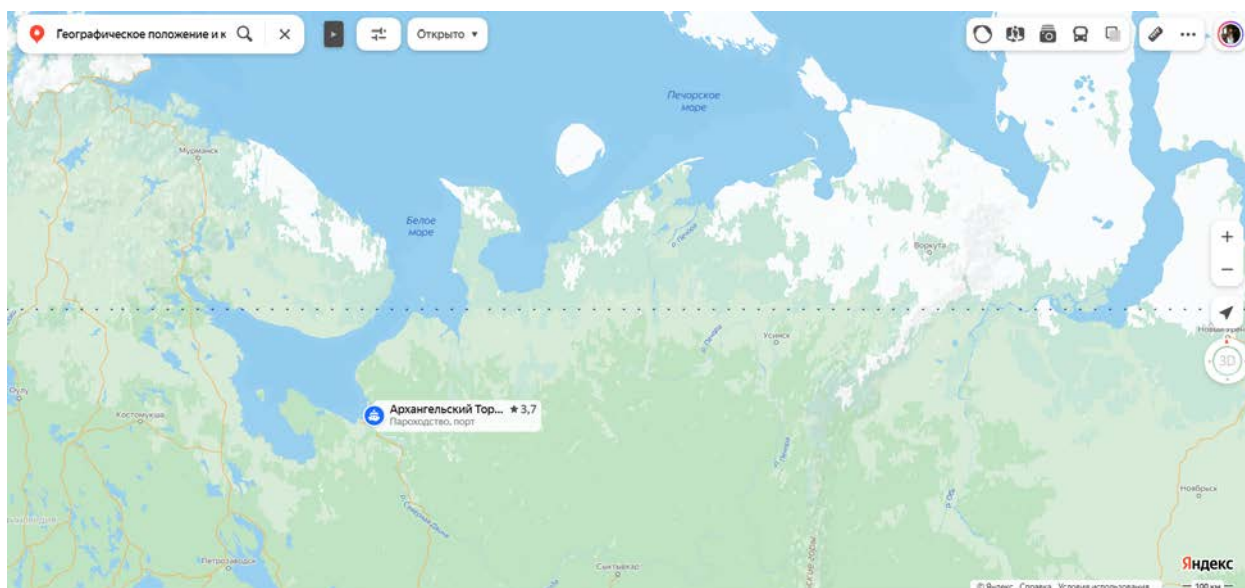


Рисунок 2.1.1 – Северный морской порт Архангельск на карте

Климатические факторы, влияющие на судоходство в архангельском порту, многогранны и зависят от изменения ледовой обстановки, колебаний

температуры и экологических проблем. По мере изменения климата динамика арктического судоходства меняется, что сказывается на безопасности судоходства и операционной эффективности. В следующих разделах описываются ключевые климатические факторы, влияющие на судоходство в этом регионе.

Ледовые условия

- **Таяние морского льда:**

Уменьшение площади старого ледяного покрова и формирование нового льда оказывают значительное влияние на судоходство, особенно в Карском и Лаптевом морях [17,30].

С одной стороны, сокращение морского льда открывает новые маршруты, которые могут сократить расстояние пути на 30–50% по сравнению с традиционными маршрутами. Более молодой и тонкий лёд позволяет судам ледового класса и обычным грузовым судам совершать более частые рейсы вдоль прибрежных зон, свободных ото льда, в летний период [30,3].

С другой стороны, изменчивость ледового покрова создаёт риски для судоходства из-за непредсказуемого и изменчивого льда. Увеличивается потребность в передовых навигационных инструментах и экспертных знаниях для обеспечения безопасности [30].

На отдельных участках Северного морского пути, например, в западной части моря Лаптевых и в восточной части Восточно-Сибирского моря, могут возникать трудности для судоходства из-за накопления двухлетних льдов, которые сохраняются после летнего таяния и представляют сложности при проводке судов [17].

- **Спрос на ледоколы:**

Несмотря на изменения климата, спрос на ледоколы для судоходства по Северному морскому пути (СМП) продолжает расти [7].

Это связано с тем, что ледовая обстановка в Северном Ледовитом океане остаётся непредсказуемой, особенно в восточной части, где навигация

затруднена круглый год. На пути следования судов по-прежнему встречаются тяжёлые льды и торосы, которые могут создавать препятствия [7,23].

Кроме того, для достижения целей развития СМП, таких как обеспечение круглогодичной навигации, необходимо увеличивать ледокольный флот. По прогнозам, в 2024 году потребуется один дополнительный ледокол для восточной части Арктики, в 2025 году — два, а с 2026 года — три дополнительных ледокола [23].

Температура и погодные условия

- **Температурные колебания:**

Температура поверхности моря в течение месяца играет важную роль в понимании процессов таяния и замерзания льда, которые влияют на маршруты судоходства [8].

Для прогнозирования осенних ледовых явлений необходимо учитывать, что образование льда начинается, когда вода охлаждается до температуры замерзания. Это происходит быстрее, если вода отдаёт тепло (что зависит от температуры воздуха над морем) и медленнее, если вода накопила тепло за предыдущий весенне-летний период (что зависит от температуры воды) [8,39].

Прогноз весенних ледовых процессов позволяет предсказать время наступления различных этапов разрушения ледяного покрова. Скорость таяния зависит от температуры воздуха над морем и толщины льда. Чем быстрее тает лёд, тем раньше происходит вскрытие и очищение моря ото льда.

Таким образом, анализ среднемесячной температуры поверхности моря помогает планировать морские операции в ледовый период, определять начало и окончание зимней навигации, а также оптимизировать использование ледоколов [8].

- **Ветер и видимость:**

Сильный ветер может привести к тому, что лёд начнёт дрейфовать, а суда — обледеневать.

Основной причиной обледенения является сильный ветер, который вызывает забрызгивание судна водой при волнении и при этом температура воздуха отрицательная.

Типичные погодные условия, при которых суда могут обледенеть: температура воздуха ниже -4°C , температура воды ниже $+3^{\circ}\text{C}$ и скорость ветра более 10 м/с [48,36].

Туман может ухудшить видимость и усложнить навигацию. В воздухе появляются водяные капли или ледяные кристаллы, которые образуют облака и явления, ухудшающие видимость в атмосфере — дымки и туманы [36,32].

Для защиты от обледенения на современных кораблях устанавливают системы электрического кабельного обогрева [19].

Воздействие на окружающую среду

- **Выбросы от судоходства:**

Рост судоходства может привести к локальным изменениям климата из-за выбросов, которые влияют на региональную динамику.

Согласно исследованию учёных из Оксфордского университета, опубликованному в 2022 году, морские суда выделяют аэрозоли, которые способствуют охлаждению атмосферы. Это происходит из-за того, что аэрозоли создают дополнительные центры конденсации, на которых формируются капли облаков. Более яркие облака отражают больше солнечного света, что предотвращает нагревание поверхности земли [43].

Кроме того, частицы чёрного углерода, выбрасываемые в Арктике, оседают на снегу, льду и морском льду, уменьшая их отражательную способность (альбедо) и усиливая поглощение тепла [5].

- **Риски для здоровья экипажа:**

Резкие изменения климата могут оказать негативное воздействие на физическое и психическое здоровье моряков, особенно в условиях экстремальной погоды [42,46].

Вот некоторые последствия такого воздействия:

1. Нарушение режима сна и бодрствования. Это может привести к повышенному риску сердечно-сосудистых заболеваний, депрессии, сонливости и снижению работоспособности [42].
2. Проблемы с опорно-двигательным аппаратом. Низкая температура и высокая влажность могут вызвать скованность и неточность движений, что снижает работоспособность [46,24].
3. Проблемы с сердечно-сосудистой системой. Учащение пульса и повышение артериального давления могут спровоцировать возникновение или обострение различных заболеваний, связанных с дыхательной, пищеварительной и нервной системами, а также с обменом веществ [46,24].
4. Психоэмоциональное напряжение. Во время арктической навигации у членов экипажа наблюдается напряжение вегетативного тонуса и повышенная возбудимость в эмоциональной сфере [42,46].

Особенно уязвимы перед воздействием климатических факторов моряки, работающие в северных широтах [46].

2.2 Географическое положение и климатические условия северного порта Сабетта

Сабетта — арктический порт на западе Обской губы Карского моря. Расположен на востоке полуострова Ямал, рядом с посёлком Сабетта(рисунок 2.2.1).

Его основная функция – транспортировка сжиженного природного газа и поддержание круглогодичного судоходства по Северному морскому пути [28].

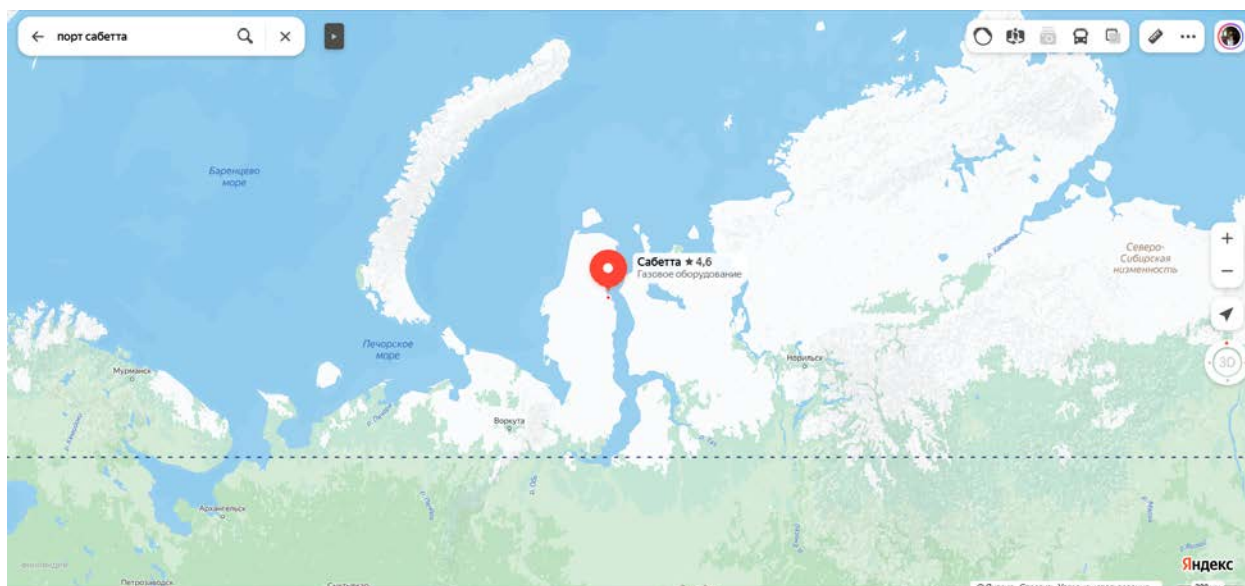


Рисунок 2.2.1 – Северный порт Сабетта на карте

Порт Сабетта, расположенный в субарктической климатической зоне, сталкивается с экстремальными природными условиями, которые оказывают значительное влияние на его хозяйственную деятельность [1]. Этот порт, один из крупнейших в Арктике, играет ключевую роль в развитии Северного морского пути (СМП) и экспорте сжиженного природного газа (СПГ) [14]. Однако климатические особенности региона создают серьёзные вызовы для его функционирования.

Климатические особенности

Климат в Сабетте характеризуется суровыми зимами и прохладным летом. Зима длится с октября по май, а лето — с июня по август, но даже в этот короткий период температуры редко превышают $+10^{\circ}\text{C}$ [37]. Среднегодовая температура составляет около -10°C , но зимой она может опускаться до -30°C , а в отдельные годы и до -50°C [2]. Летом температура может подниматься до $+30^{\circ}\text{C}$, но такие случаи редки [31].

Эти экстремальные температурные колебания создают значительные эксплуатационные сложности. Например, зимой необходимо использовать специальные морозостойкие материалы для строительства, а оборудование требует защиты от обледенения [50]. Летом, несмотря на относительно низкие

температуры, существует риск образования наледи, что также требует дополнительных мер предосторожности [12].

Среднегодовая скорость ветра в Сабетте составляет 7–10 м/с, но зимой интенсивность ветра значительно возрастает. Штормы с порывами до 25–30 м/с не редкость, что усложняет швартовку судов и создаёт дополнительную нагрузку на портовую инфраструктуру [29]. Преобладающие северо-восточные и юго-западные ветры приводят к ветровой коррозии металлических конструкций, что требует регулярного технического обслуживания и ремонта.

Порт Сабетта окружён Баренцевым и Карским морями, где ледовый покров формируется с октября по июнь. К марту толщина льда достигает 1,5–2 метров, что делает навигацию крайне сложной и опасной [26]. Навигационный период в Сабетте ограничен 100–120 днями с июля по октябрь. Для обеспечения бесперебойного движения судов используются атомные ледоколы, которые пробивают путь во льдах и сопровождают транспортные суда.

Осадки в Сабетте распределяются относительно равномерно, составляя 300–400 мм в год [9]. Большая часть осадков выпадает в виде снега, который покрывает землю на 220–250 дней в году [45]. Устойчивый снежный покров высотой 50–70 см создаёт дополнительные трудности для передвижения и эксплуатации техники [54].

Летом, когда снег начинает таять, часто возникают туманы, которые могут наблюдаться до 40–60 дней за сезон [9]. Туманы существенно осложняют судоходство, особенно в ночное время и в условиях ограниченной видимости [21].

Влияние климата на портовую деятельность

Климатические условия оказывают комплексное воздействие на работу порта Сабетта. Короткий навигационный период требует высокой интенсивности грузовых операций, чтобы максимально использовать ограниченное время. Низкие температуры и сильные ветры увеличивают

эксплуатационные расходы на содержание портовой инфраструктуры и обслуживание оборудования [44].

Логистика также усложняется из-за необходимости использования зимников и вертолётного транспорта в холодное время года. В условиях вечной мерзлоты строительство инфраструктуры требует специальных решений, таких как свайные фундаменты и системы антиобледенения.

2.3 Географическое положение и климатические условия северного морского порта Диксон

Диксон – российский арктический морской порт, расположенный на берегу Карского моря (рисунок 2.3.1). Одна его часть находится на западном краю полуострова Таймыр, другая – на острове Диксон. Эти части порта разделяет полуторакилометровый пролив, по которому зимой проходит трасса-зимник [51].

Диксон является замерзающим портом, навигация в нем длится с июня по октябрь. Судоходство в морском порту осуществляется в соответствии с Общими правилами плавания и стоянки судов в морских портах РФ, Обязательными постановлениями в морском порту Диксон.

Морской порт используется в основном для обеспечения военных объектов и жизнедеятельности одноимённого поселка, а с началом возрождения СМП в 2000-х годах – для гидрометеорологического и гидрографического обслуживания трассы.

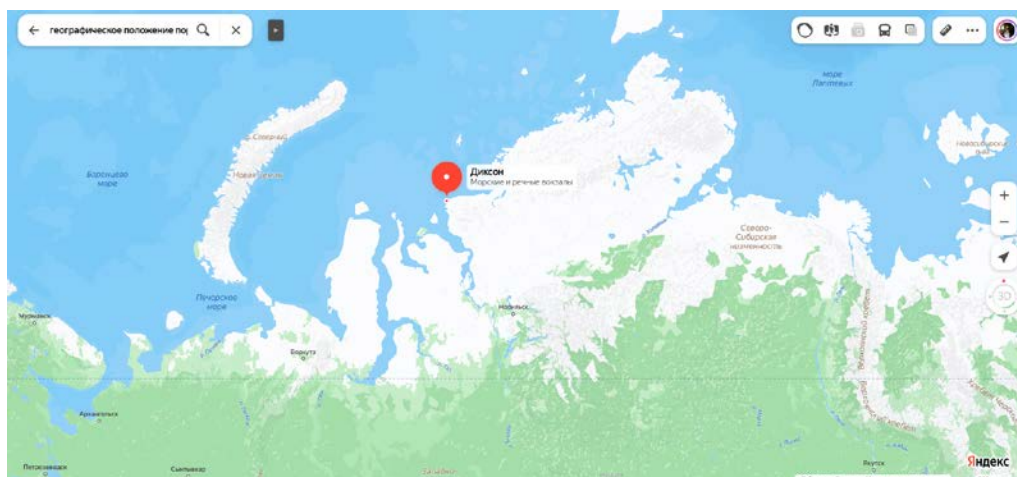


Рисунок 2.4.1 – Северный морской порт Диксон

Перспективы развития поселка оцениваются в связи с особенностями его географического положения. Диксон - единственный действующий порт на всем побережье Карского моря - одного из наиболее сложных секторов трассы Северного морского пути. Физико-географические условия этого участка обуславливают большие трудности для плавания судов. В Карском море круглогодично присутствует сложная ледовая обстановка, встречаются подводные опасности и области с довольно малыми глубинами. Постоянное преобладание пасмурных дней негативно влияет не только на работу магнитных компасов, но и на визуальное ориентирование судов.

Порт Диксон играет важную роль для экономики и логистики региона. Но его работа осложняется суровостью климата. Зимой температура в порту может достигать отметки в -30 градусов Цельсия и ниже, что приводит к образованию льда на судах, портовых постройках, оборудовании и дорогах.

Лёд, образующийся на судах, может привести к нарушению целостности корпуса, что, в свою очередь, требует больших затрат на ремонт. Чтобы предотвратить образование льда используют специализированное оборудование (тепловые пушки, антиобледенительные растворы и системы обогрева).

Большую часть года акватория в районе порта Диксон покрыта льдом. Лёд создаёт препятствия для судов, что затрудняет использование привычных

маршрутов. Чтобы обеспечить безопасность судоходства, необходимо использовать ледакольную технику.

С июля по октябрь ледовая обстановка в порту становится благоприятной, что позволяет судам без проблем заходить в порт. Из-за короткого навигационного сезона сокращается время, отведённое на транспортировку товаров.

Регион подвержен влиянию сильных ветров, которые могут достигать ураганной силы, что вызывает штормы и высокие волны, которые усложняют швартовку судов и проведение погрузочно-разгрузочных работ. Так же, сильные порывы ветра могут нанести ущерб портовым сооружениям и оборудованию. Штормы могут привести к задержкам доставок грузов, так как, для своей безопасности, суда вынуждены дожидаться окончания неблагоприятных условий.

Летом порт Диксон окутывает туман, что приводит к ухудшению видимости и повышению вероятности аварийных ситуаций. В условиях ограниченной видимости применяются дополнительные инструменты, такие как радиолокаторы, спутниковые системы GPS и гидролокаторы. Все эти устройства помогают кораблям ориентироваться в тумане, исключая столкновение с другими судами или портовыми объектами.

Таяние арктических льдов, вследствие глобального потепления, влияет на ледовую обстановку в регионе. Пока неизвестно какие последствия ожидаются от этого. Изменения ледовой обстановки может продлить навигационный период и открыть новые перспективы для судоходства, а может сделать ледовый покров менее стабильным, вызвать усиление штормов и изменения погодных условий.

В связи с этими переменами, порт Диксон должен разработать гибкие планы действий. Важно принимать во внимание вероятные перемены в состоянии льда и погоды, а также быть готовыми к возможным экстремальным погодным условиям. Это подразумевает обновление навигационных систем,

улучшение оборудования и подготовку сотрудников к работе в новых условиях.

В зимнее время года порт Диксон погружается в полярную ночь. Это значит, что солнце не появляется над горизонтом на протяжении нескольких месяцев. В таких условиях ориентироваться визуально становится сложно, поэтому требуется дополнительное освещение.

2.4 Географическое положение и климатические условия северного морского порта Дудинка

Порт Дудинка, расположенный на правом берегу реки Енисей в Красноярском крае, имеет координаты $69^{\circ}24'$ северной широты и $86^{\circ}10'$ восточной долготы. Это важный транспортный узел на Северном морском пути (рисунок 2.4.1).

Порт работает в суровых условиях арктического климата России, что создаёт определённые трудности в его функционировании. Для эффективной работы порта необходимо использовать передовые технологии и инженерные решения.

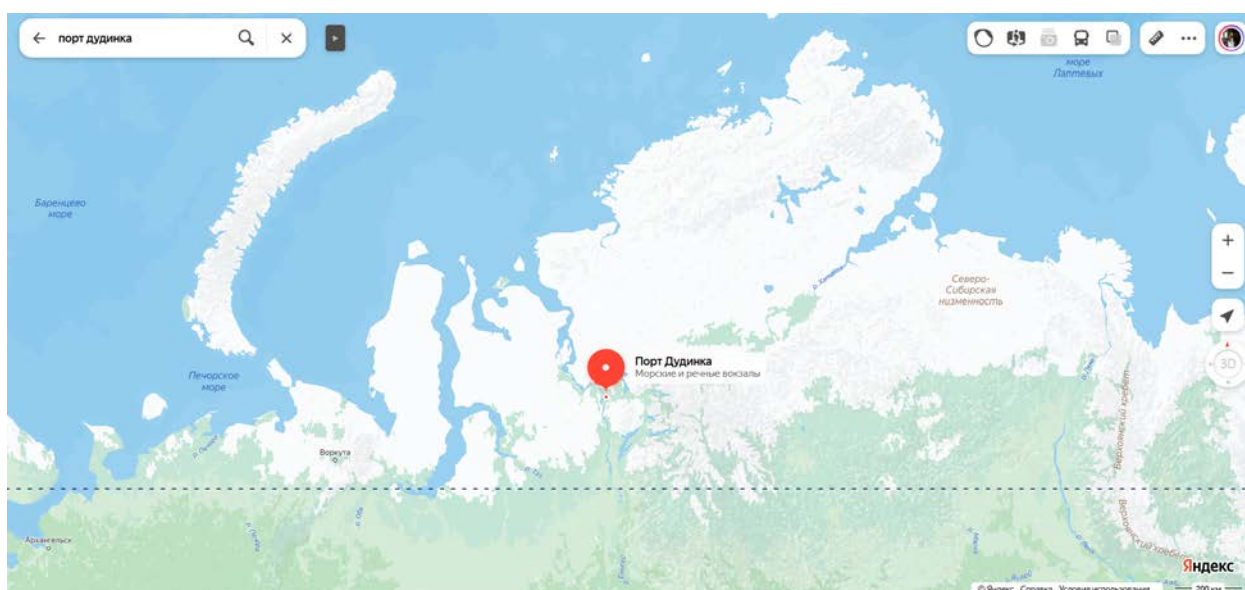


Рисунок 2.4.1 – Северный порт Дудинка

Климат Дудинки характеризуется резкой континентальностью и ярко выраженными сезонными различиями. Зимний период длится около семи месяцев, с октября по апрель. Средняя температура в январе колеблется от -28°C до -30°C , а абсолютные минимумы могут достигать -50°C и ниже. Такие экстремальные холода требуют использования специальных материалов и технологий, устойчивых к морозам, при строительстве портовой инфраструктуры.

Зимой преобладают сильные ветры со средней скоростью 5–7 м/с и порывами до 15–20 м/с. Они усиливают ощущение холода и вызывают снежные заносы, что затрудняет проведение погрузочно-разгрузочных работ.

Ледовый режим Енисея также оказывает значительное влияние на навигацию. Ледостав начинается в середине октября и продолжается до конца мая — начала июня. К концу зимы толщина льда достигает 1,5–2 метров, что делает невозможным судоходство без ледокольной проводки.

Летний период, который длится с июня по август, характеризуется более мягкими температурами (средняя температура июля составляет $+12^{\circ}\text{C} \dots +14^{\circ}\text{C}$), но даже в это время возможны заморозки. Частые туманы (до 40 дней за сезон) и штормовые ветры осложняют навигацию.

Осадки в Дудинке составляют около 400–500 мм в год, большая часть которых выпадает в тёплый период. Это может приводить к временному подтоплению портовой территории.

Вечная мерзлота, покрывающая всю территорию порта, оказывает значительное влияние на его функционирование. Глубина сезонного протаивания грунта составляет 0,5–1,5 метра, что требует использования специальных инженерных решений. Например, при строительстве применяются свайные фундаменты и термостабилизирующие устройства, которые предотвращают протаивание грунта и обеспечивают устойчивость сооружений.

Экстремальные климатические условия оказывают значительное влияние на работу порта Дудинка. Ограниченный навигационный период

требует тщательного планирования грузопотоков и интенсификации погрузочно-разгрузочных работ в летний сезон. Ледокольное сопровождение судов существенно увеличивает стоимость перевозок.

Кроме того, низкие температуры зимой приводят к повышенным затратам на содержание инфраструктуры и эксплуатацию техники. Сильные ветры и туманы затрудняют навигацию, а осадки могут вызывать временное подтопление портовой территории. Всё это требует разработки и внедрения комплекса адаптационных мер для минимизации климатических рисков.

Чтобы успешно функционировать в условиях арктического климата, порт Дудинка применяет ряд адаптационных мер:

- Применение ледоколов способствует увеличению навигационного периода, что влечёт за собой более эффективное использование портовых ресурсов;
- Автоматизация основных технологических процессов ускоряет обработку судов, повышая их пропускную способность;
- Формирование дополнительных складских помещений компенсирует вероятные сбои в логистике.

Порт Дудинка остаётся ключевым пунктом Северного морского пути, даже несмотря на климатические сложности. Он играет ключевую роль в транспортировке груза для региона, что делает порт стратегически важным для экономики России.

2.5 Изучение особенностей функционирования портов в арктической зоне.

Порты Арктического региона России имеют большое значение для развития Северного морского пути, организации грузоперевозок и освоения северных территорий. Они служат важными узлами для транспортировки

товаров, обеспечения удалённых районов и укрепления экономических отношений с зарубежными партнёрами.

Эти порты играют ключевую роль в транспортной системе государства, обеспечивая связь между внутренними регионами и международным сообществом. Они стимулируют развитие промышленного производства, сельского хозяйства и других секторов экономики.

Таблица 2.5.1 – Сравнительная характеристика портов по географическому положению и значению ²

Параметр	Архангельск	Сабетта	Диксон	Дудинка
Расположение	Белое море, устье Сев. Двины	Обская губа, п-ов Ямал	Карское море, п-ов Таймыр	Енисей, Красноярский край
Роль в СМП	Южные ворота Арктики	Ключевой СПГ-терминал	Опорный пункт навигации	Главный речной порт Енисея
Грузооборот (млн т, 2024 г)	2,6	29,2	16,3	3,3

Вывод: в результате реализации проекта «Ямал СПГ» Сабетта стала крупнейшим логистическим центром. Архангельск — город с многовековой историей, который традиционно был ключевым пунктом арктического судоходства. Дудинка — значимый речной порт для Норильского промышленного региона. Диксон — важный стратегический объект, но не слишком загруженный.

² Таблица создана автором по данным, полученным в ходе исследования

Таблица 2.5.2 – Сравнительная характеристика арктических портов по климатическим условиям и периоду навигации³

Параметр	Архангельск	Сабетта	Диксон	Дудинка
Период навигации	Май-ноябрь (180 дней)	Июль – октябрь (100 дней)	Июль-сентябрь (80 дней)	Июнь – октябрь (120 дней)
Ср. $t^{\circ}C$ января	-12	-25	-28	-30
Ледовая обстановка	Льды с декабря по апрель	Толщина льда до 2 м	Сильное обледенение	Ледовый покров 1,5-2 м
Основные риски	Штормы Белого моря	Короткая навигация + туманы	Полярная ночь + штормы	Морозы + ледоход на Енисее

Вывод: Сабетта и Диксон — это регионы, где навигация сопряжена с высоким риском из-за сложной ледовой обстановки. Архангельск же, напротив, представляет собой наиболее благоприятное место для судоходства. Дудинка же находится в зоне влияния ледохода на реке Енисей.

Таблица 2.5.3 - Сравнительная характеристика арктических портов по инфраструктуре и грузовой спецификации⁴

Параметр	Архангельск	Сабетта	Диксон	Дудинка
Основные грузы	Лес, уголь, генеральные	СПГ, нефтепродукты	Продовольствие	Никель, медь, уголь
Глубина у причалов	8–11 м	15 м (углублённый фарватер)	6–8 м	7–9 м

³ Таблица создана автором по данным, полученным в ходе исследования

⁴ Таблица создана автором по данным, полученным в ходе исследования

Продолжение таблицы 2.5.3

Параметр	Архангельск	Сабетта	Диксон	Дудинка
Ледокольное обеспечение	Не требуется	Атомные ледоколы	Ледоколы сопровождения	Речные ледоколы
Крупные проекты	Реконструкция порта	"Ямал СПГ", "Арктик СПГ-2"	Военная база	"Норильский никель"

Вывод: Сабетта — порт, оснащённый по последнему слову техники, включая терминалы для СПГ; Архангельск — универсальный порт, но требующий модернизации; Дудинка — порт, ориентированный на нужды Норильска; Диксон — порт с недостаточно развитой инфраструктурой.

Таблица 2.5.4 - Сравнительная характеристика арктических портов по перспективе развития⁵

Порт	Планы развития
Архангельск	Расширение контейнерного терминала, развитие СМП
Сабетта	Строительство новых СПГ – заводов, увеличение грузооборота до 50 млн т
Диксон	Возрождение как логистического хаба для СМП
Дудинка	Модернизация причалов для большегрузных судов

⁵ Таблица создана автором по данным, полученным в ходе исследования

Таблица 2.5.5 – Итоговая сравнительная таблица арктических портов⁶

Критерий	Архангельск	Сабетта	Диксон	Дудинка
Грузооборот	Средний	Максимальный	Минимальный	Низкий
Климатические сложности	Умеренные	Экстремальные	Экстремальные	Высокие
Инфраструктура	Устаревшая	Современная	Слабая	Средняя
Перспективы	Стабильные	Быстрый рост	Неопределённые	Зависит от Норильска

Заключение: Сабетта — это ключевой участник в сфере арктической логистики, особенно в контексте транспортировки сжиженного природного газа; Архангельск остаётся важным южным портом Северного морского пути; Дудинка играет ключевую роль в обеспечении работы Норильского промышленного узла; Диксон имеет стратегическое значение, но не является экономически значимым.

Основываясь на информации, представленной ранее, можно сформулировать следующие советы по улучшению работы портов:

- Необходимо усилить ледокольный флот в Сабетте и Диксоне.
- Следует инвестировать в модернизацию инфраструктуры в Архангельске и Дудинке.
- Важно внедрить систему спутникового мониторинга во всех портах Арктики.

Выводы по главе: в рамках второй главы выпускной квалификационной работы были изучены климатические условия арктических портов, относящихся к северному морскому пути и проведён сравнительный анализ арктических портов с последующим предоставлением рекомендаций по развитию портов.

⁶ Таблица создана автором по данным, полученным в ходе исследования

Глава 3. Создание трёхмерной цифровой модели рельефа в районе арктических портов

3.1 Сбор данных для построение цифровой модели рельефа местности

Для создания трёхмерной цифровой модели рельефа в районе арктических портов в первую очередь требуется осуществить сбор данных. В качестве исходных данных будут использованы спутниковые данные, хранящиеся в виде гридов (от англ. grid).

Grid — это область, разбитая с регулярным шагом на ячейки, в каждой из которых содержится значение параметра. Шаг разбиения может быть нерегулярным, а схема покрытия не обязательно прямоугольной (гексогональной, криволинейной, полигонометрической) [25].

Некоторые примеры гридов: снимки, которые получают с помощью космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Например, спутник Landsat 7 (сенсор ETM+) позволяет получать снимки с 7 каналами (от видимого спектра до инфракрасного), а датчики MODIS аппаратов Terra и Aqua содержат 36 каналов [25].

Grid файлы — эффективный способ хранения данных, так как расположение значения внутри грида не указывается явно, а также оно постоянно, что позволяет легко сравнивать данные от разных сенсоров или за разные периоды времени [52].

Для скачивания grid данных был использован сайт GEBCO [54].

GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) — это глобальная база данных, которая содержит информацию о рельефе дна океанов (рисунок 3.1.1).

Доступные данные с сайта GEBCO:

Глобальные сетки:

- GEBCO 2024 (актуальная версия) с разрешением 15 угловых секунд (~450 метров на экваторе);
- Более старые версии (GEBCO_2019, GEBCO_2014 и другие).

Форматы:

- NetCDF (основной формат, поддерживает метаданные);
- ESRI ASCII Grid;
- CSV (для точечных данных).

Типы данных:

- Только батиметрия (глубина в метрах);
- Комбинированные данные (батиметрия + топография суши).

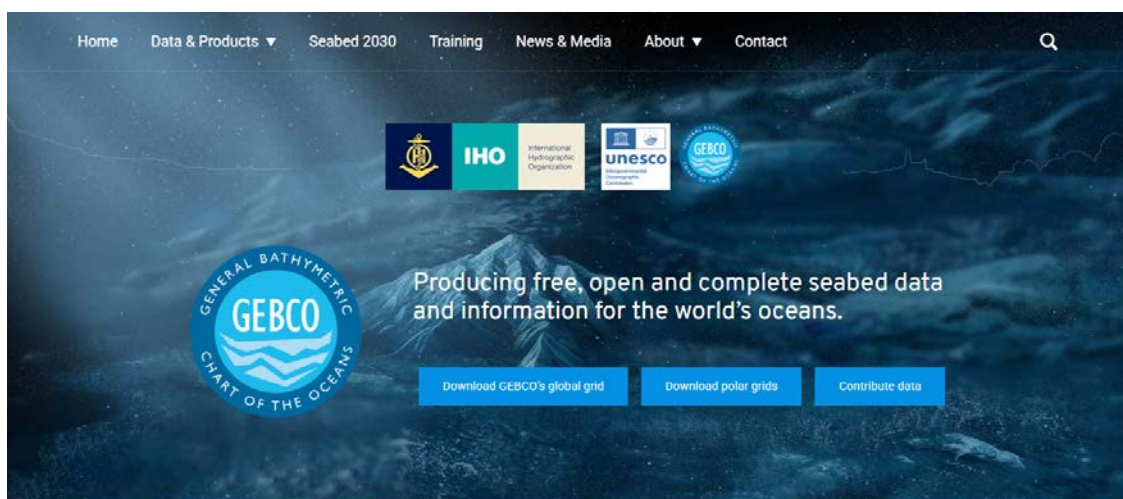


Рисунок 3.1.1 – Главная страница сайта GEBCO

На данном сайте представлен бесплатный инструмент, с помощью которого можно выбрать интересующую для исследования область и скачать пакет данных (рисунок 3.1.2 – 3.1.3).

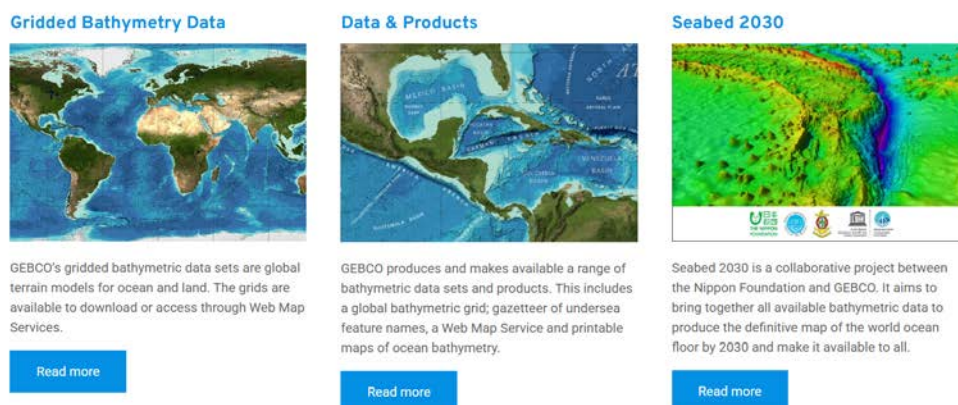


Рисунок 3.1.2 – Разделы с бесплатными инструментами сайта GEBCO

Переходим в раздел «Gridded Bathymetry Data» (рис. 3.1.3).

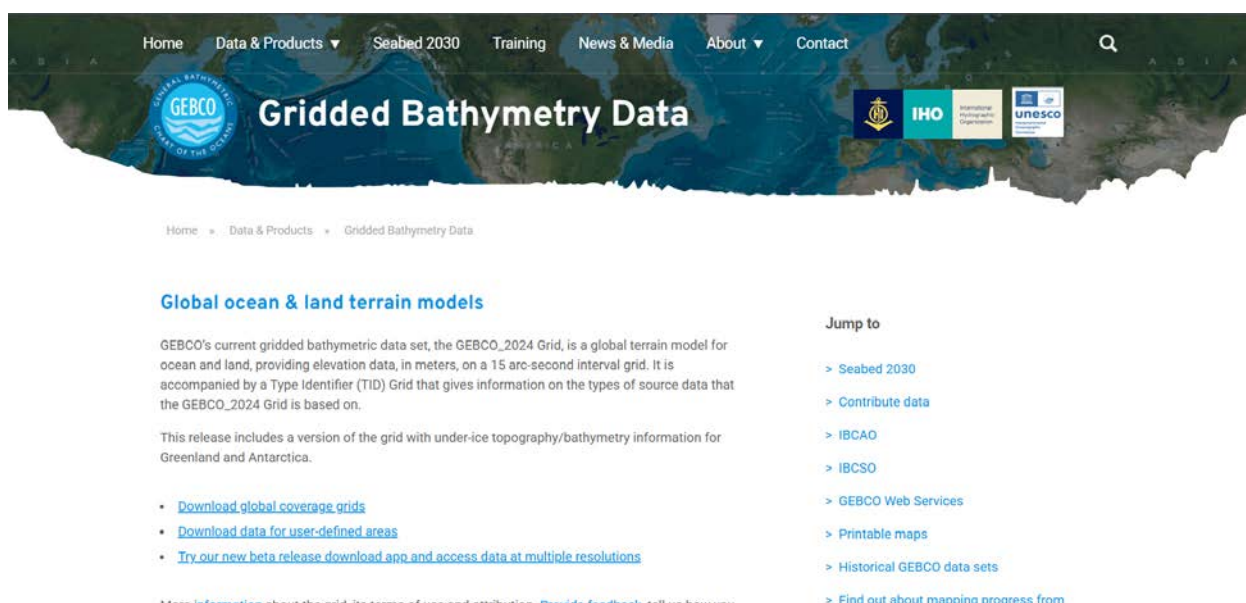


Рисунок 3.1.3 – Раздел «Gridded Bathymetry Data»

В этом разделе находим ссылку на инструмент «Download data for user-defined areas» [55] и переходим по ней. (рис. 3.1.4)

Download data for user-defined areas

Use our [application](#) to select and download data in netCDF, Esri ASCII raster and data GeoTiff formats.

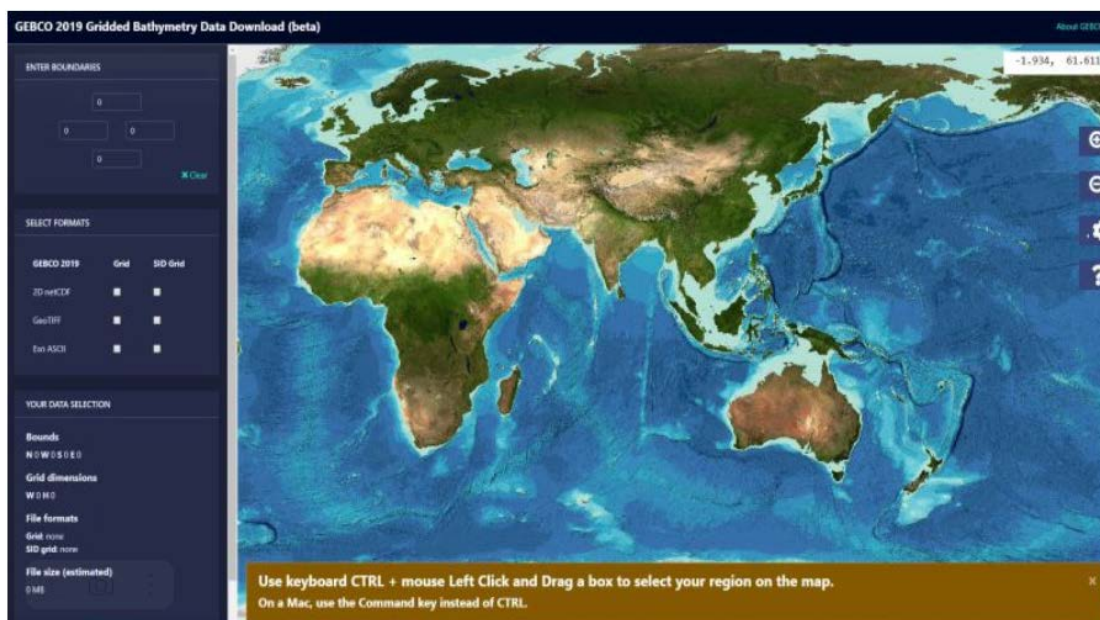


Рисунок 3.1.4 – Интерфейс инструмента для скачивания данных

Для создания цифровой модели рельефа дна, в данном случае, будут использоваться снимки с GEBCO 2024, полученные в формате GeoTiff.

В качестве примера работы инструмента будет выступать алгоритм скачивания данных для порта Архангельск. (рис. 3.1.5 - 3.1.8)

Первым этапом выбираем в левом верхнем углу в разделе «Select Grid Version» grid версию.



Рисунок 3.1.5 – Варианты Grid версии

Далее, вносим координаты области исследования в раздел «Enter Boundaries».

Рисунок 3.1.6 – Координаты области исследования

По введении координат области исследования инструмент произведёт отображение выбранной области на карте.

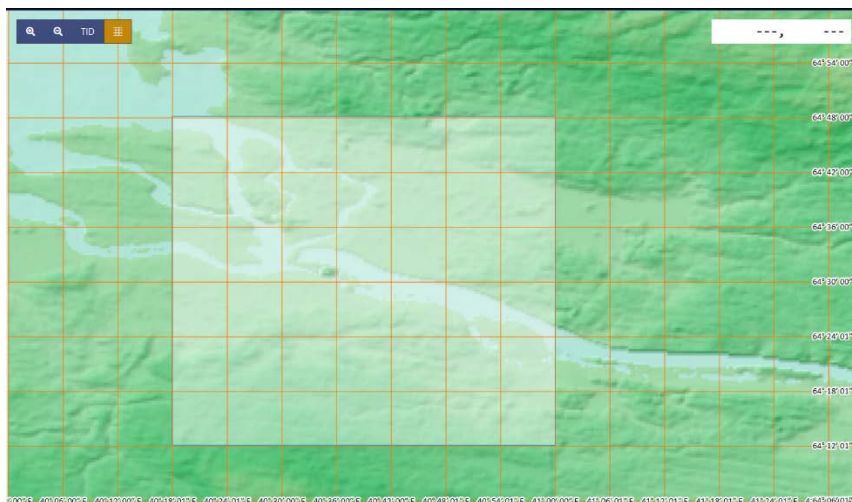


Рисунок 3.1.6 – Выбранная область – местность в районе порта Архангельск

Заключительным этапом в скачивании данных является выбор формата. Для этого в разделе «Select Format» выбираем интересующий формат. В данном случае – GeoTiff.

SELECT FORMATS		
	Grid	TID Grid
2D netCDF	☐	☐
GeoTIFF	☒	☐
Esri ASCII	☐	☐

Рисунок 3.1.7 – Выбор формата скачиваемых данных

Далее переходим в раздел «Your Data Selection» и добавляем выбранные данные в корзину. Для того чтобы получить файл с данными необходимо зайти в корзину и ввести свой адрес электронной почты, на который будет направлено письмо с файлом.

Your data downloads basket

×

Grid: GEBCO 2024

North: 64.803, South: 64.202, West: 40.299, East: 41

Formats: Grid - GeoTIFF

✕ Delete

Terms of use for the GEBCO Grid

It will take a while to generate the download.

Please provide your email address and we will send you a download link when it's ready.

Email *

anastasia180569@gmail.com

✕ Empty basket

📧 Email download link

Рисунок 3.1.8 – Получение данных с сайта GEBCO

В ходе практической части выпускной квалификационной работы так же будут созданы цифровые модели рельефа дна следующих портов: Сабетта, Диксон, Дудинка. Выбранные области исследования данных портов представлены на рисунках 3.1.9 – 3.1.11.

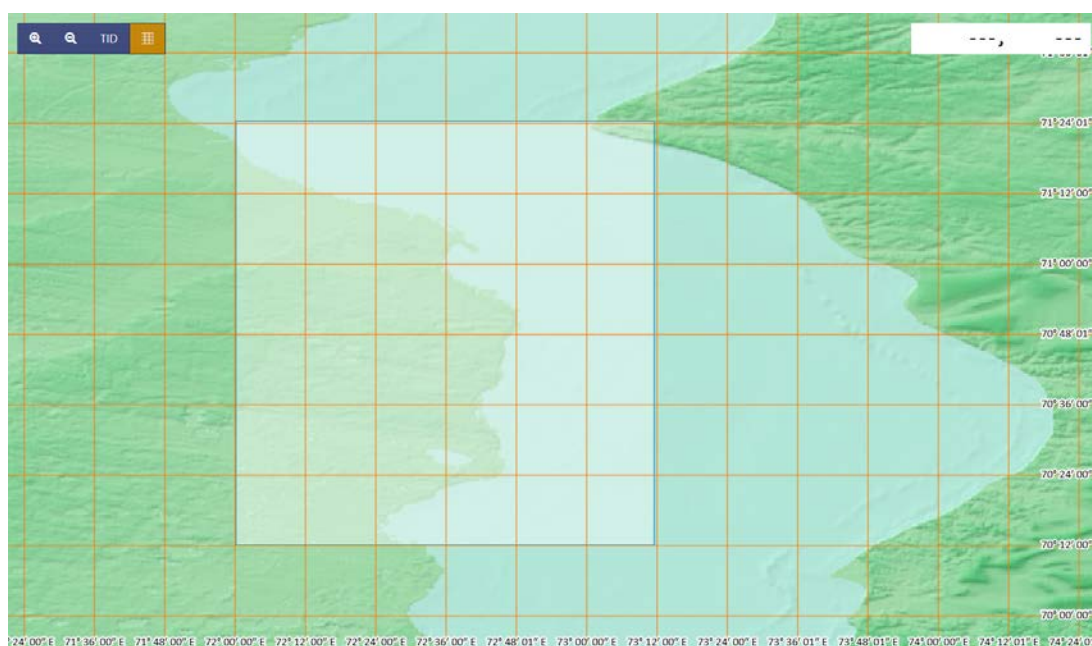


Рисунок 3.1.9 – Выбранная область – местность в районе порта Сабетта

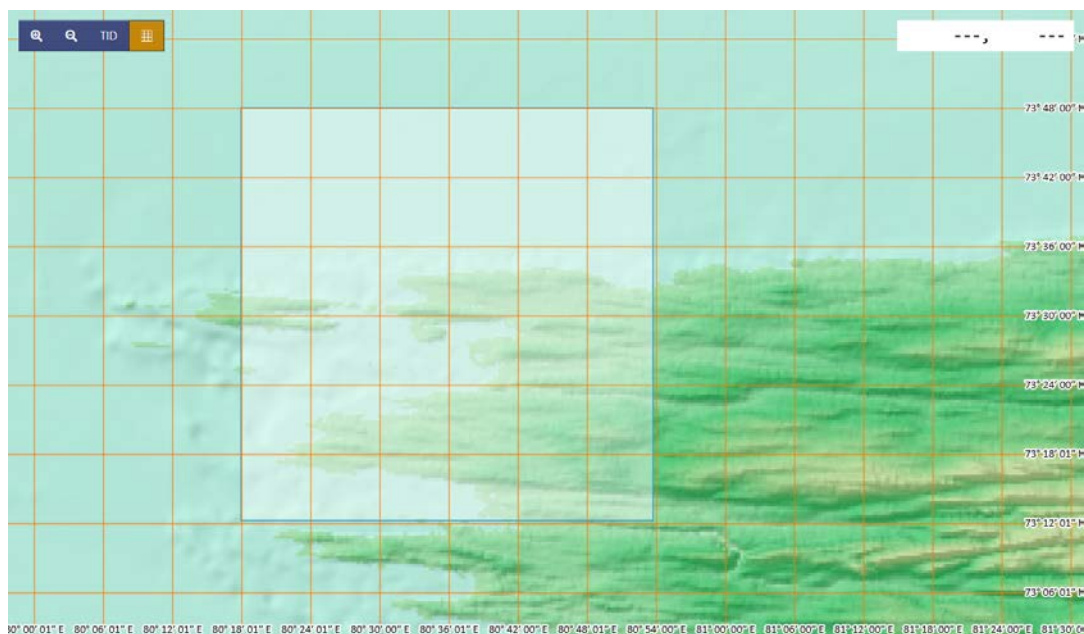


Рисунок 3.1.10 – Выбранная область – местность в районе порта Диксон

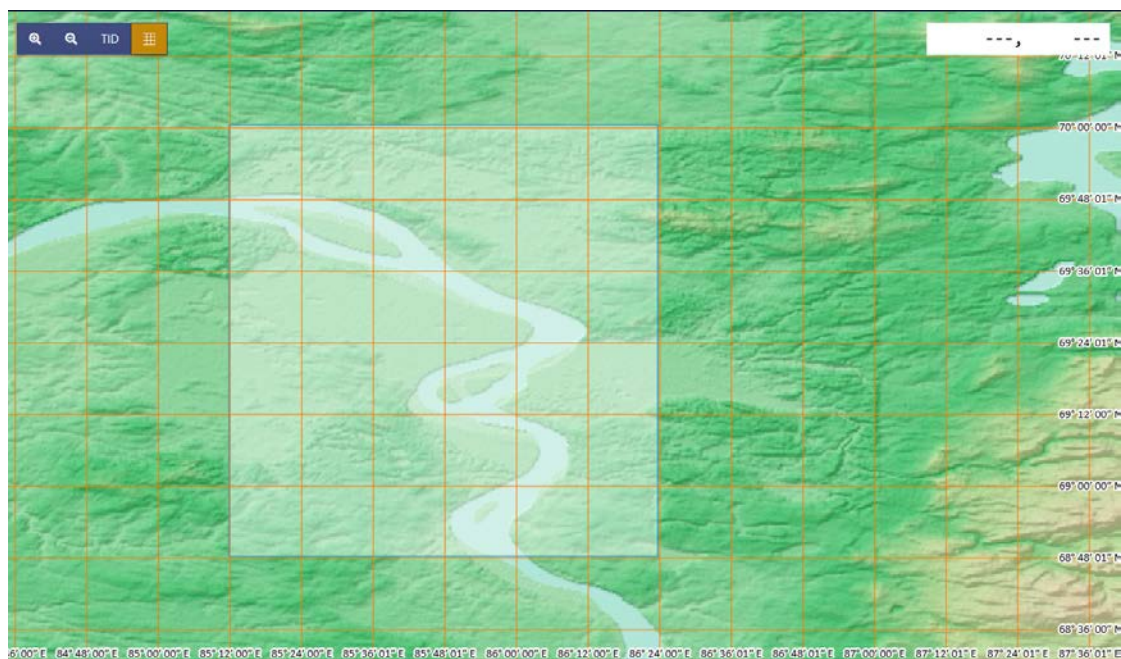


Рисунок 3.1.11 – Выбранная область – местность в районе порта Дудинка

3.2 Обработка исходных данных для создания цифровой модели рельефа

Для дальнейшего создания трёхмерной цифровой модели рельефа в районе арктических портов, необходимо обработать полученные спутниковые

снимки. Обработка снимков будет проводиться в приложениях QGIS [33] и SAGA GIS [64].

QGIS — это бесплатная и открытая геоинформационная система, доступная для установки на Windows, Mac, Linux и BSD. Она позволяет создавать, редактировать, анализировать, визуализировать и публиковать геопространственные данные. QGIS хорошо документирована на русском языке, а также имеет активное русскоязычное сообщество пользователей и разработчиков.

Основные возможности QGIS расширяются благодаря модулям, которые можно установить через меню «Управление модулями». Эти модули охватывают широкий спектр задач: от геокодирования и упрощения геометрии до интеграции с веб-картографическими сервисами и 3D-моделирования ландшафта [4].

SAGA GIS (Система автоматизированного геоинформационного анализа) — это компьютерная программа, которая используется для работы с пространственными данными. Она представляет собой географическую информационную систему (ГИС) и является бесплатным программным обеспечением с открытым исходным кодом.

SAGA GIS была разработана на факультете физической географии Геттингенского университета в Германии.

Основные функции SAGA GIS включают сбор, управление, анализ и представление данных. Программа поддерживает работу с векторными и растровыми моделями данных, при этом акцент делается на анализе растровых данных [35].

Алгоритм обработки спутниковых данных будет показан на примере обработки снимка местности в районе порта Архангельск. (рис. 3.2.1 – 3.2.8)

Первым этапом загружаем снимок в рабочую директорию QGIS.



Рисунок 3.2.1 – Загруженный снимок местности в районе порта Архангельск

Далее переходим в свойства слоя и меняем отображение изображения с одноканального серого на одноканальное псевдоцветное и меняем цветной ряд. При разработке цифровых моделей рельефа дна будет использован цветовой ряд «wiki-2.0», расположенный по пути: «Свойства» —> «Цветовой ряд» —> «Создать новый градиент» —> «Каталог: cpt-city» —> «Topography/bathymetry».

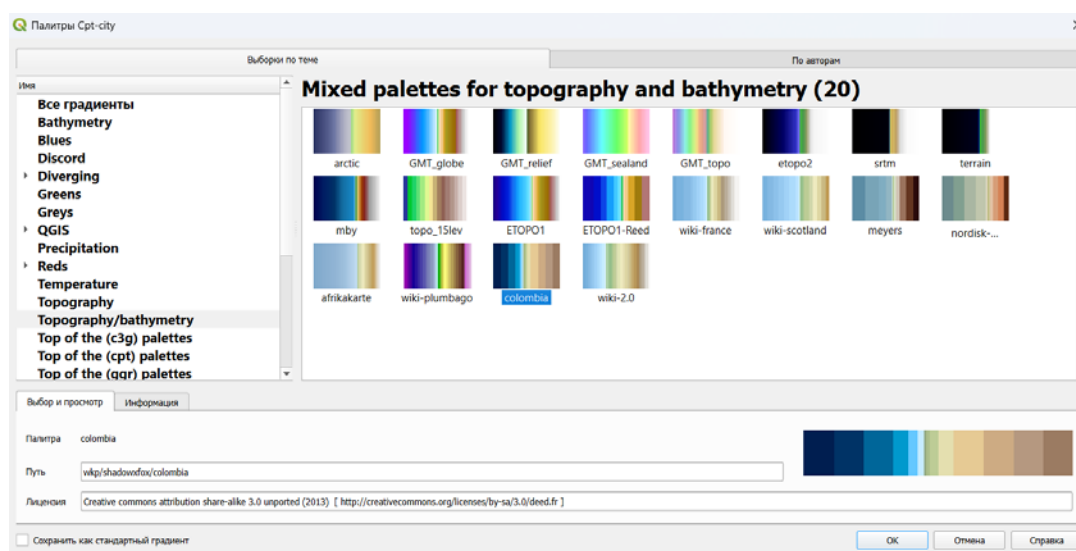


Рисунок 3.2.2 – Изменение отображения снимка

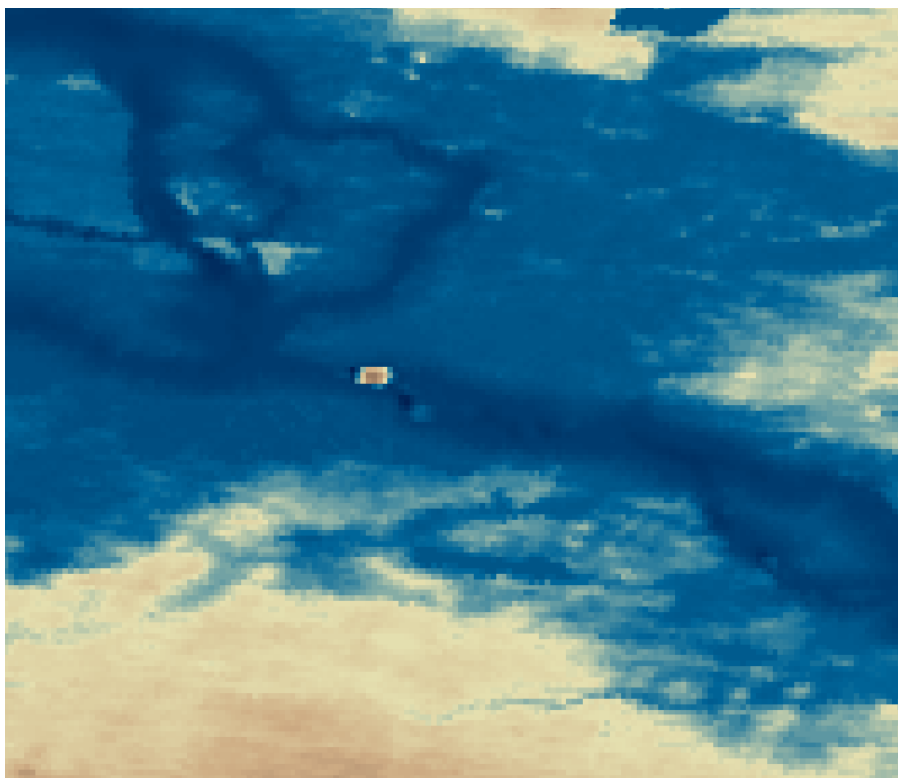


Рисунок 3.2.3 – Результат смены отображения снимка

После чего строим изолинии. Для этого переходим по пути: «Растр» —> «Извлечение» —> «Создать изолинии». Применяем настройки, показанные на рисунке 3.2.4.

Рисунок 3.2.4 – Настройки для создания изолиний

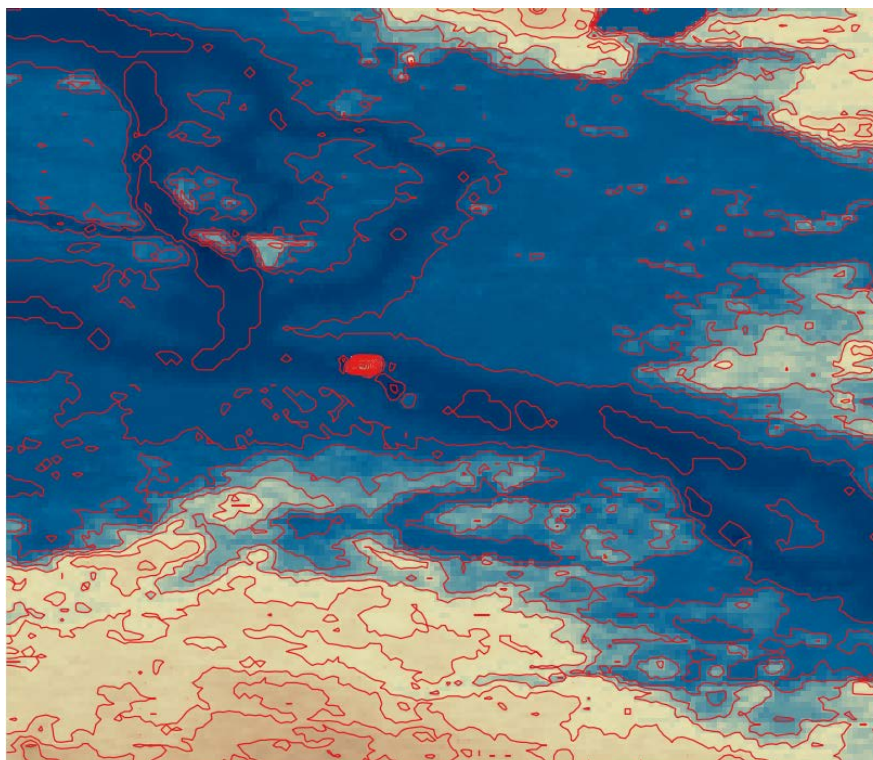


Рисунок 3.2.5 – Результат создания изолиний

После построения изолиний, полученный слой необходимо скачать и загрузить в SAGA GIS.

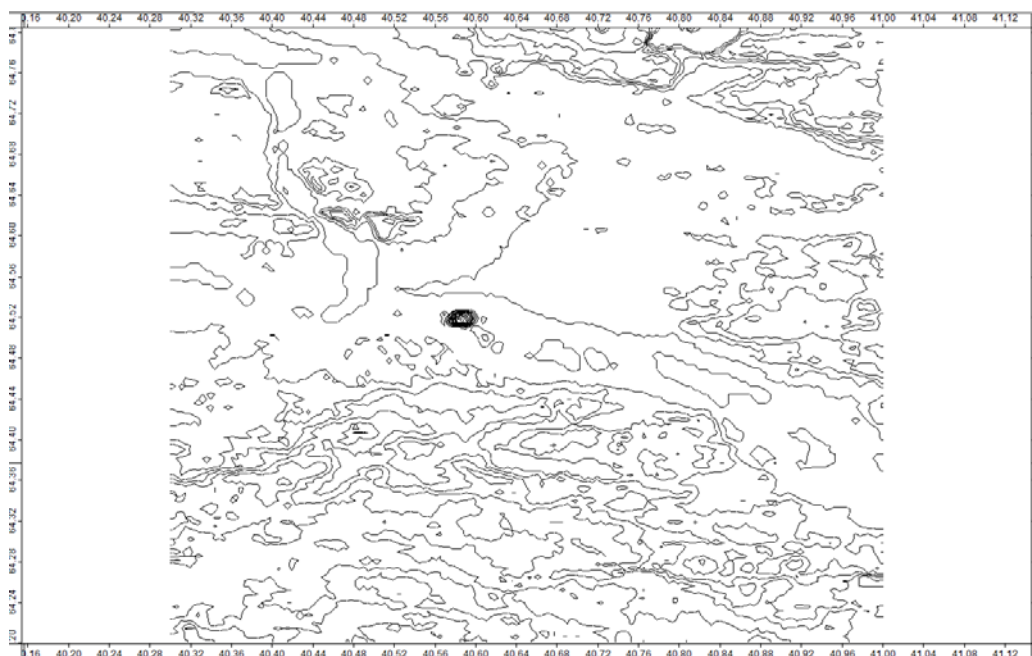


Рисунок 3.2.6 - Слой с изолиниями, загруженный в рабочую директорию SAGA GIS

Следующим этапом проводим интерполяцию загруженных изолиний. Для этого переходим по пути: «Tools» —> «Spline Interpolation» —> «Multilevel B-Spline».

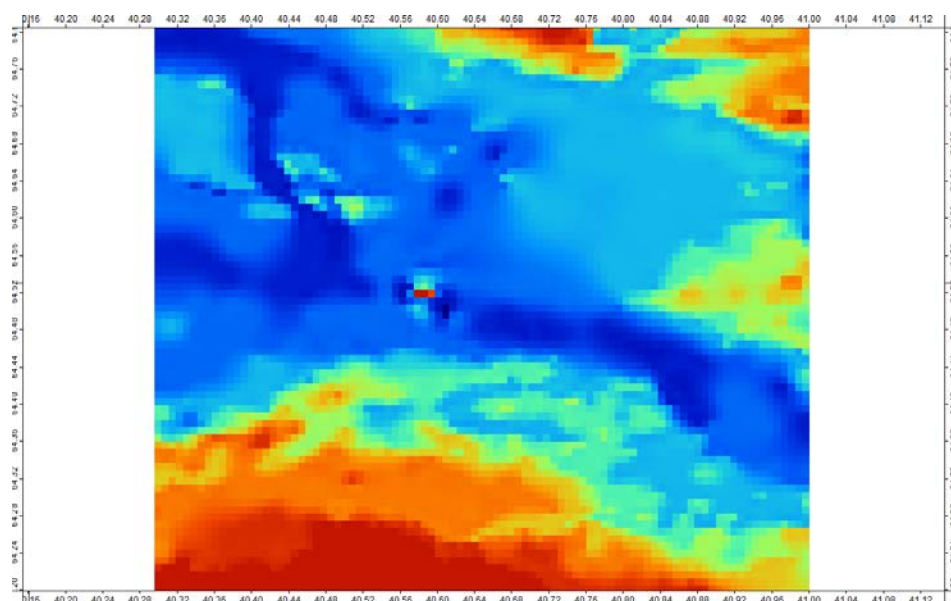


Рисунок 3.2.7 – Результат интерполяции изолиний

Для наглядности к отображению результата интерполяции можно подключить отображение слоя изолиний.

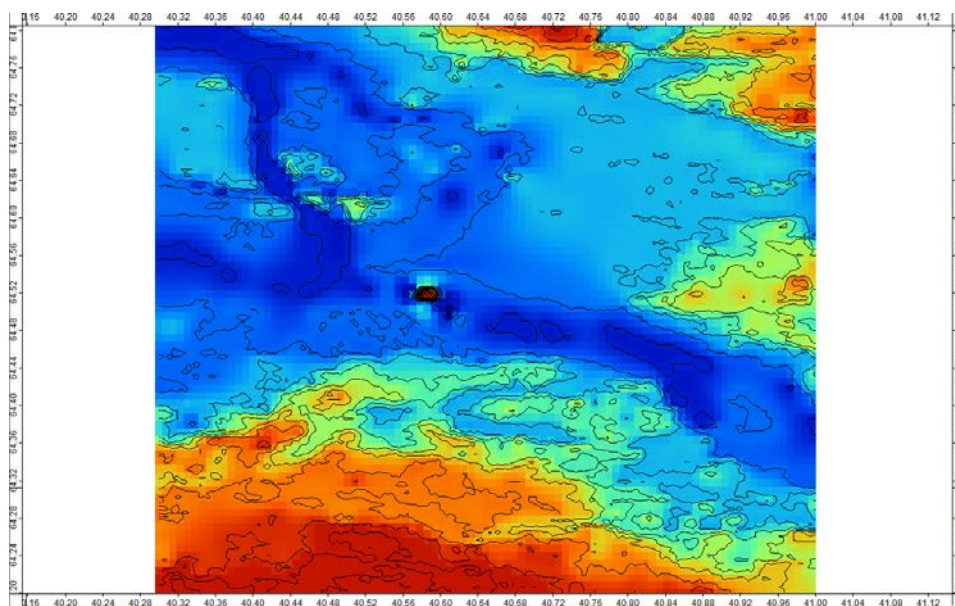


Рисунок 3.2.8 – Созданный grid файл рельефа (в каждой ячейке содержится значение высоты)

Результат сохраняем. Для этого переходим по пути: «Tools» —> «Import\Export» —> «Grids» —> «Export ESRI Arc\Info Grid».

Обработка снимка для порта Сабетта:

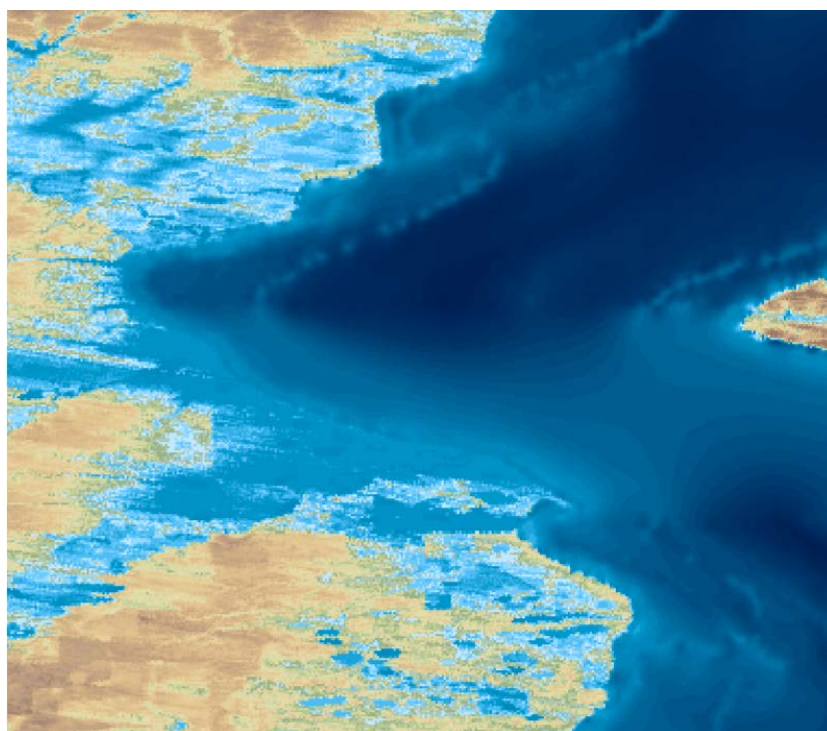


Рисунок 3.2.9 – Изменение отображения

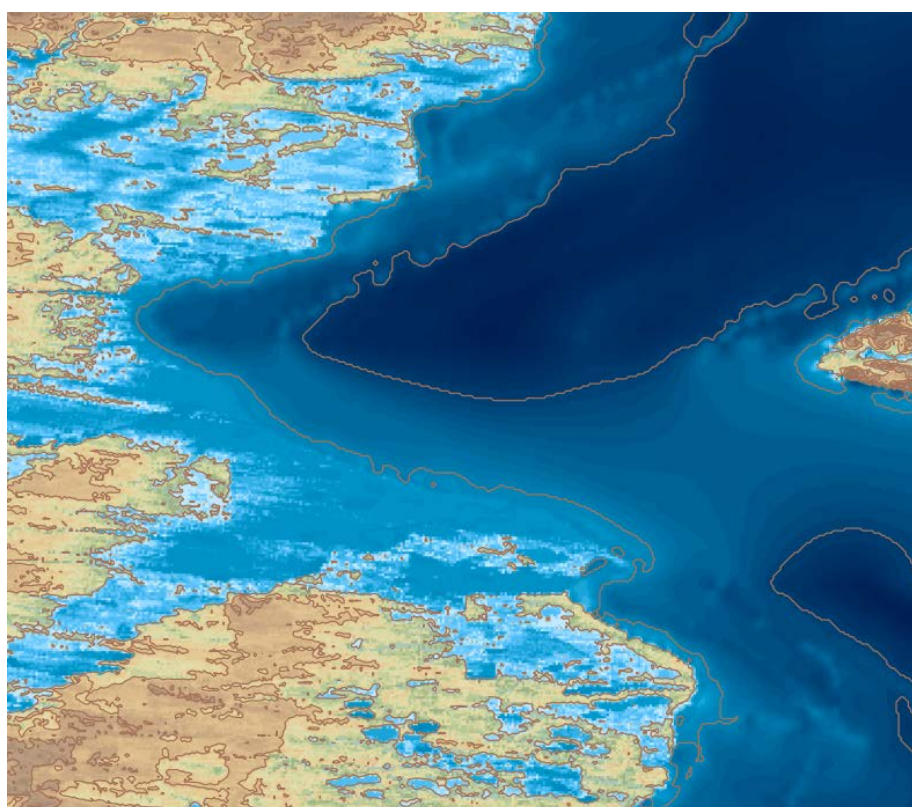


Рисунок 3.2.10 – Создание изолиний

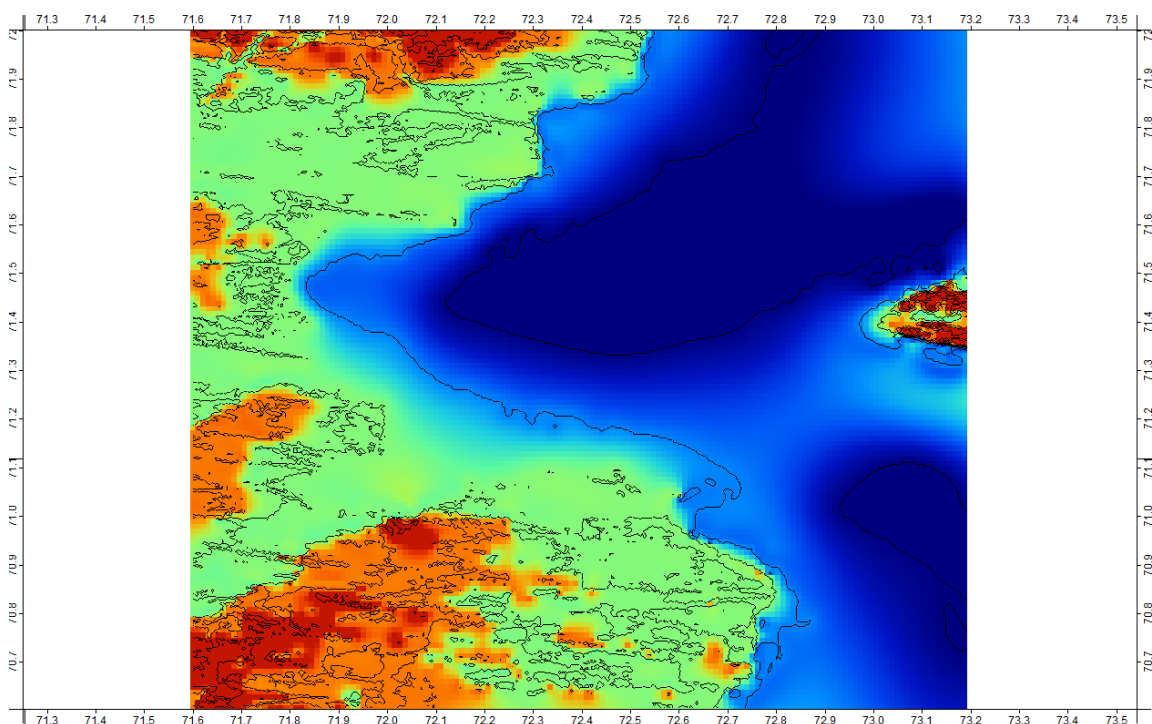


Рисунок 3.2.11 – Созданный grid файл рельефа

Обработка снимка для порта Диксон:

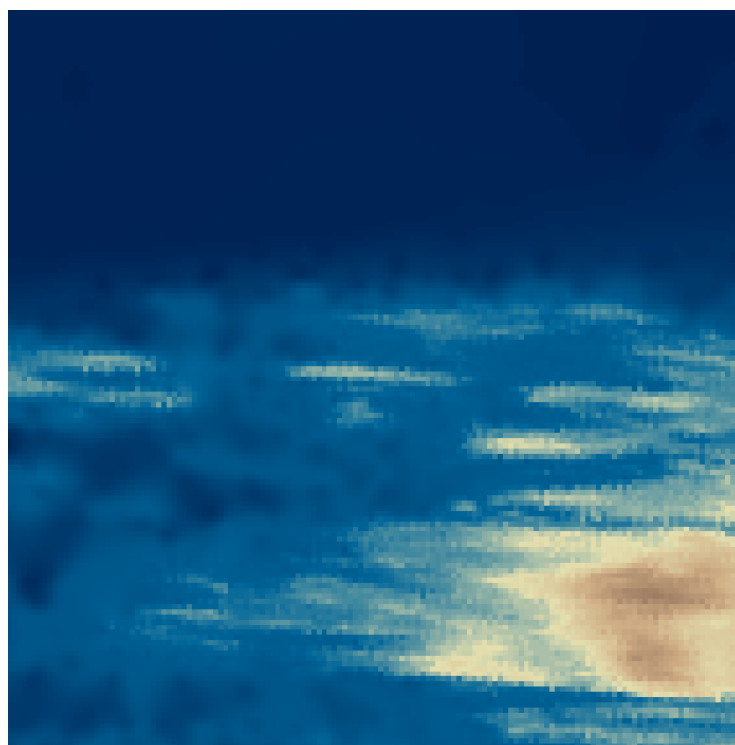


Рисунок 3.2.12 – Изменение отображения

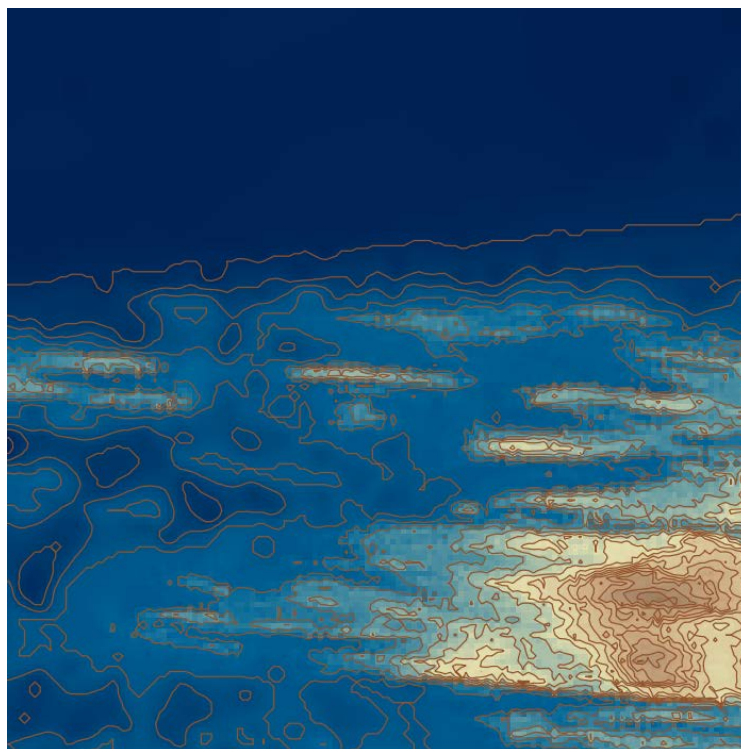


Рисунок 3.2.13 – Создание изолиний

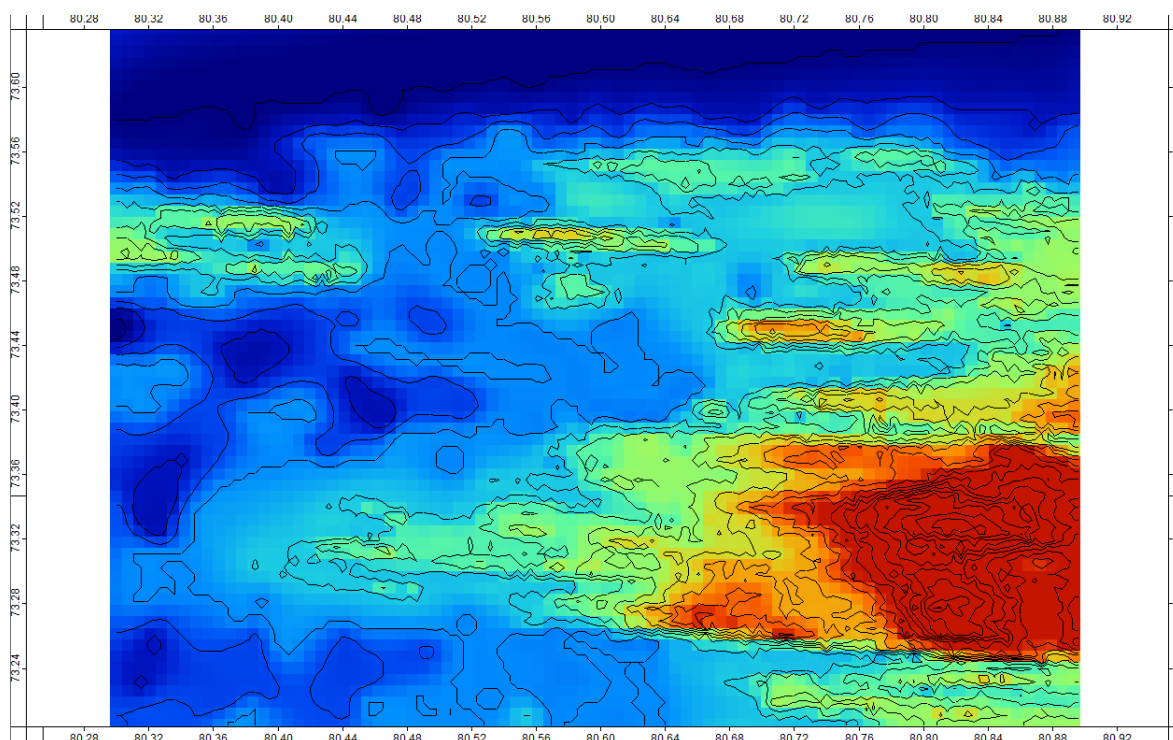


Рисунок 3.2.14 - Созданный grid файл рельефа

Обработка снимка для порта Дудинка:

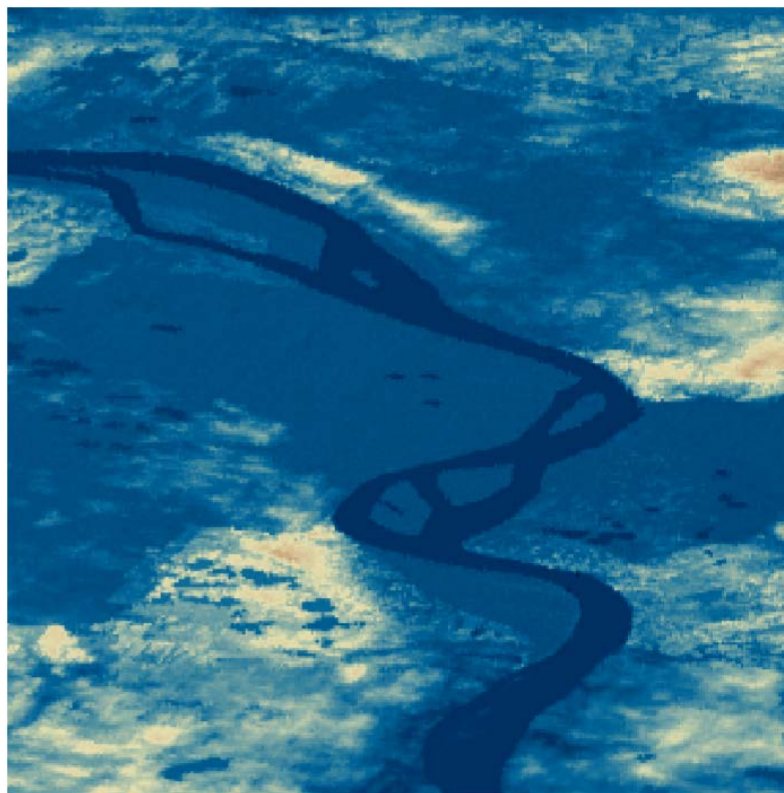


Рисунок 3.2.15 – Изменение отображения

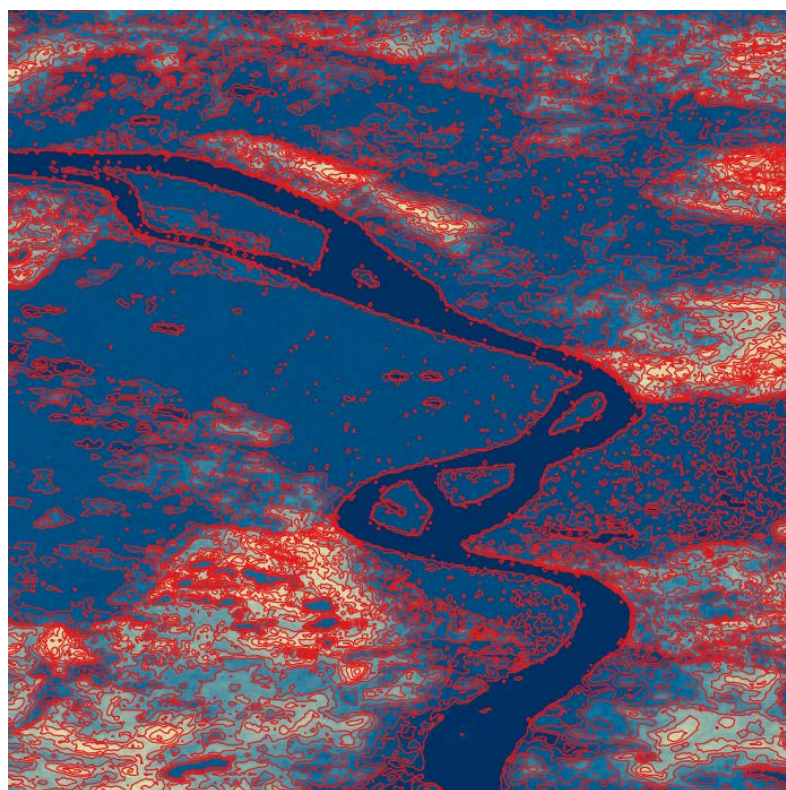


Рисунок 3.2.16 – Созданные изолинии

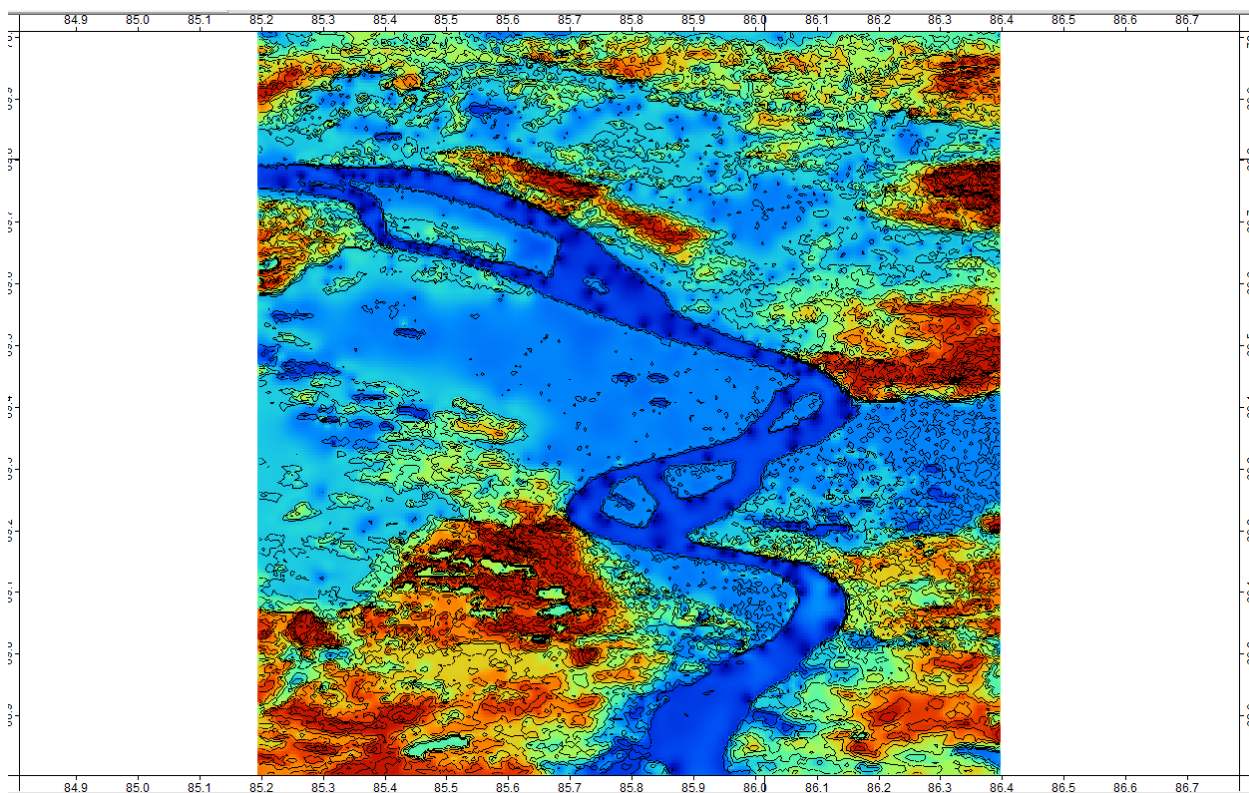


Рисунок 3.2.17 - Созданный grid файл рельефа

3.3 Создание макетов цифровой модели рельефа

После создания grid файлов модели рельефа в SAGA GIS и их сохранения на компьютере, возвращаемся в QGIS.

В данном разделе будет выполнено создание макетов цифровых моделей рельефа местности в районе арктических портов. В качестве примера алгоритма создания модели будет выступать порт Архангельск. (рис. 3.3.1 – 3.3.6)

Для начала, загружаем полученный в программе SAGA GIS grid файл в QGIS.

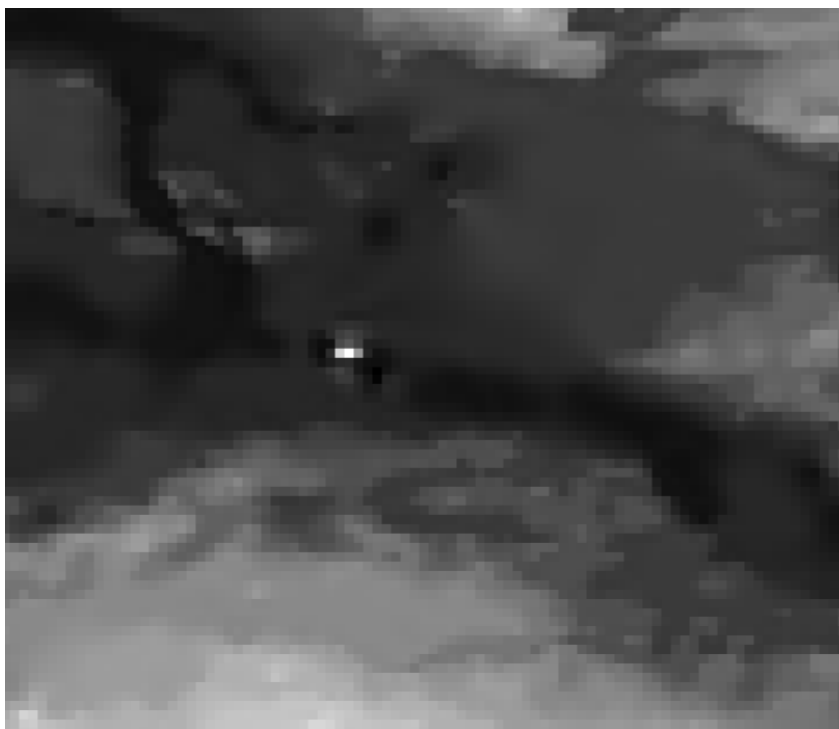


Рисунок 3.3.1 – Рельеф порта Архангельск, загруженный в рабочую директорию QGIS

Следующим шагом меняем отображение изображения с одноканального серого на теневой рельеф с кубической интерполяцией. Для этого переходим в раздел «стиль», расположенный в свойствах слоя, и выставляем настройки, показанные на рисунке 3.3.2.

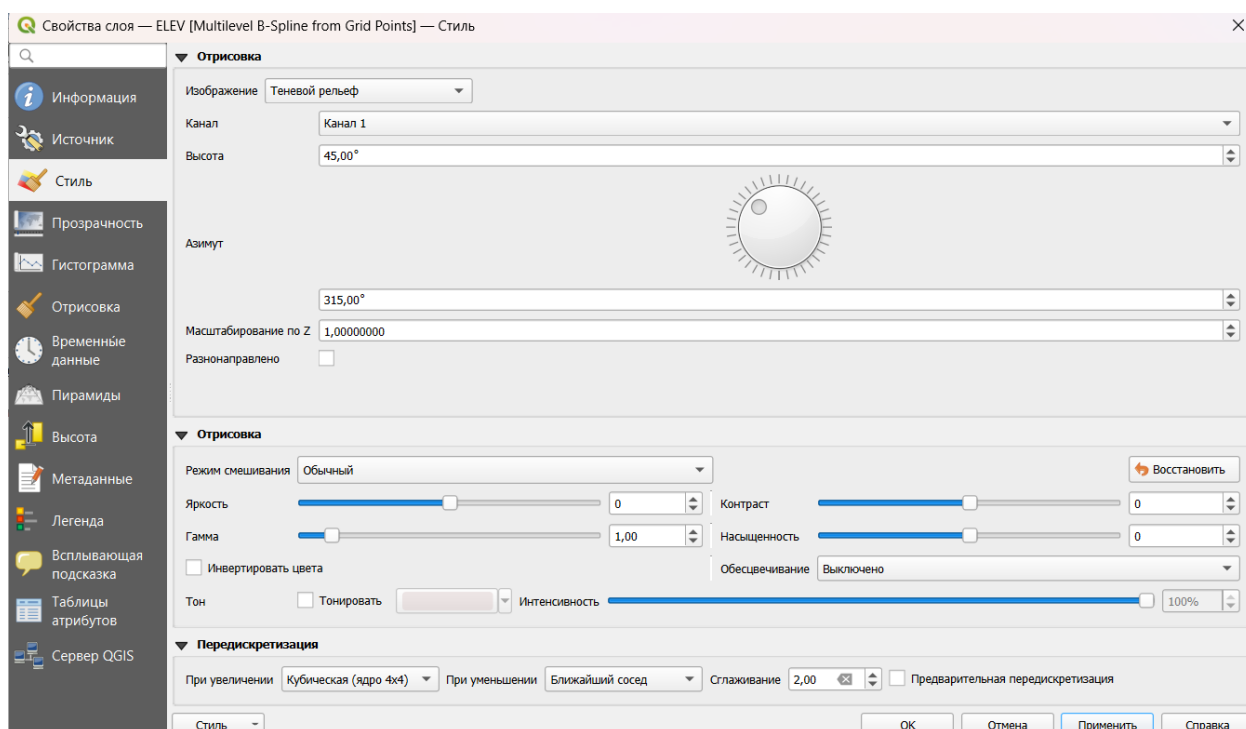


Рисунок 3.3.2 – Настройки для изменения отображения слоя

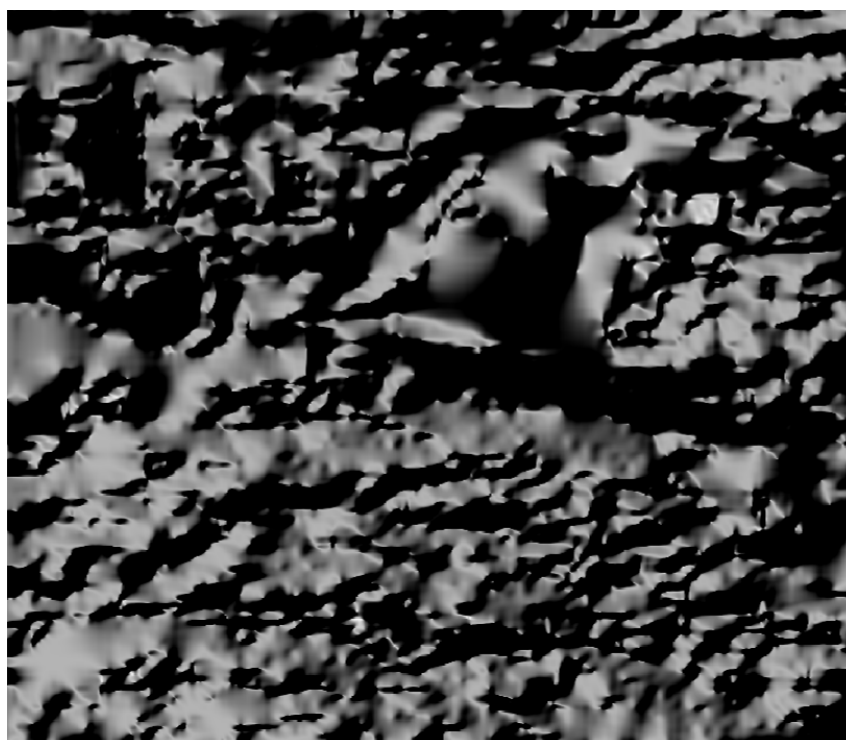


Рисунок 3.3.3 - Результат изменения отображения

Дублируем слой с теневым рельеф и меняем его отображение на одноканальное псевдоцветное. (рис. 3.3.4)

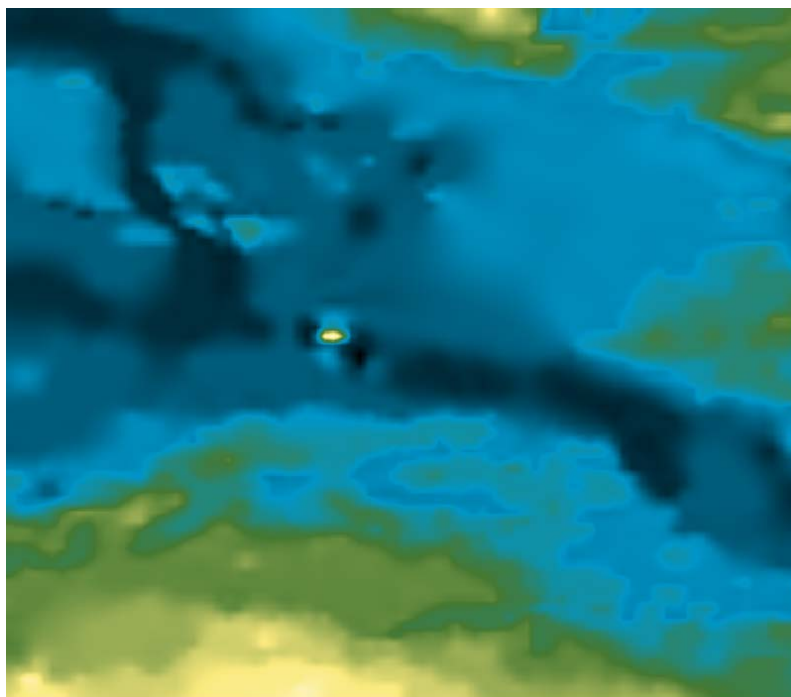


Рисунок 3.3.4 – Результат изменения отображения у дубликата слоя

Далее у оригинального слоя меняем настройки, выставив режим смешивания слоёв. (рис. 3.3.5) Результат смешивания слоёв представлен на рисунке 3.3.6.

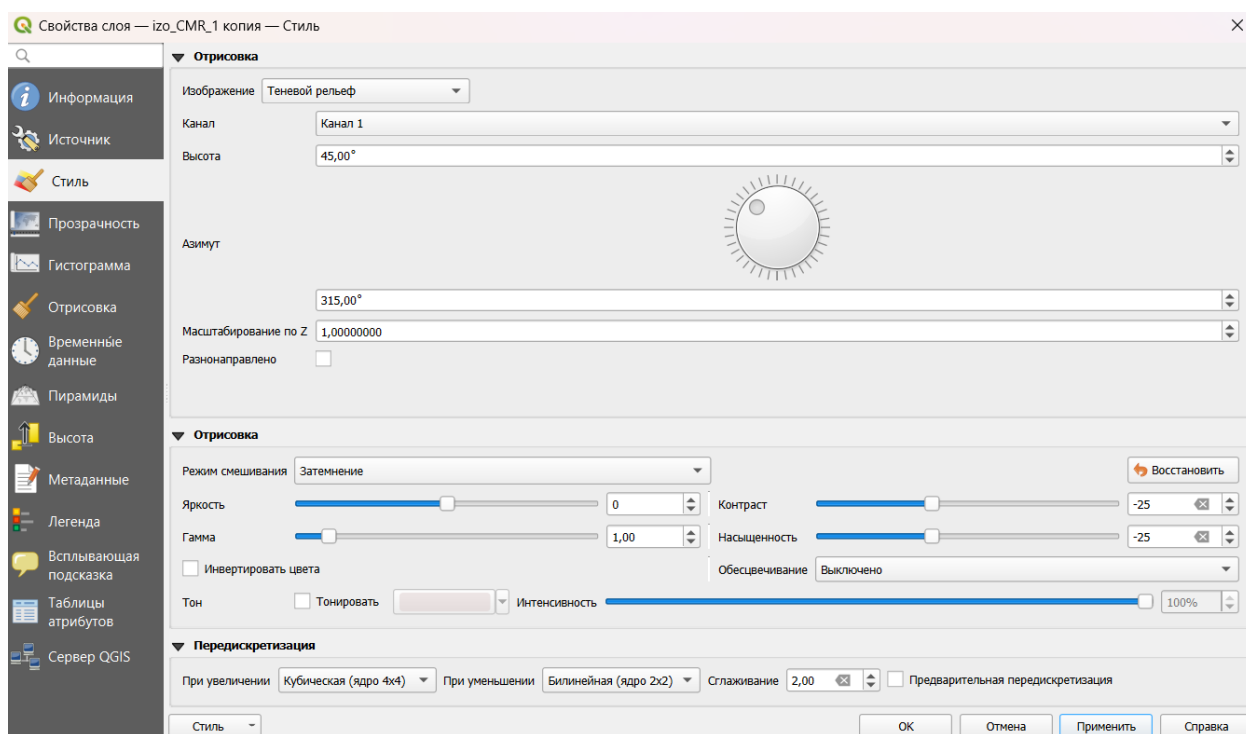


Рисунок 3.3.5 – Настройки для смешивания двух слоёв

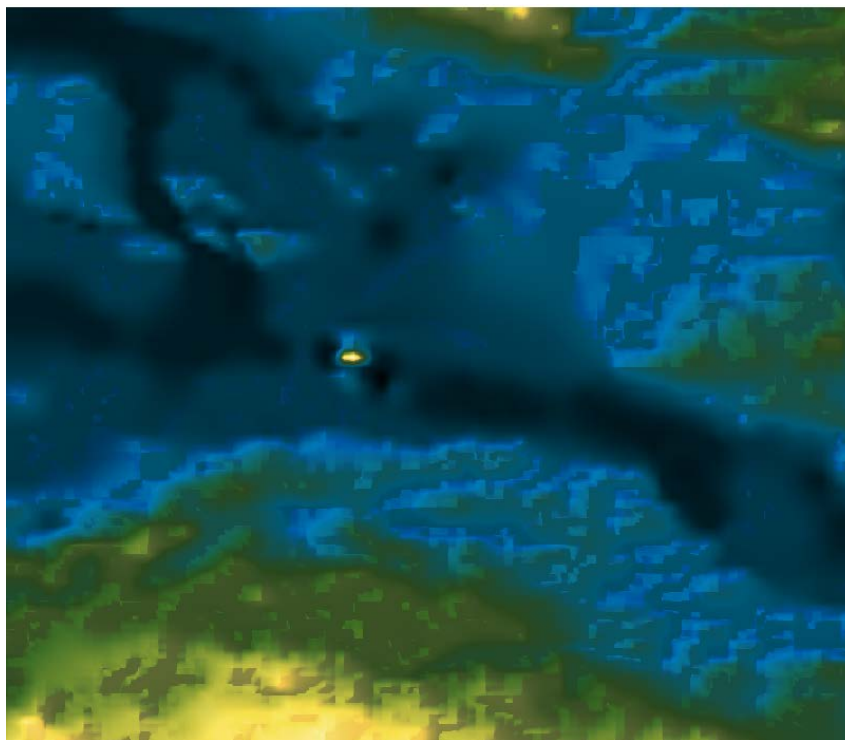


Рисунок 3.3.6 – Результат смешивания двух вариантов отображения слоя

Макет рельефа дна для порта Сабетта:

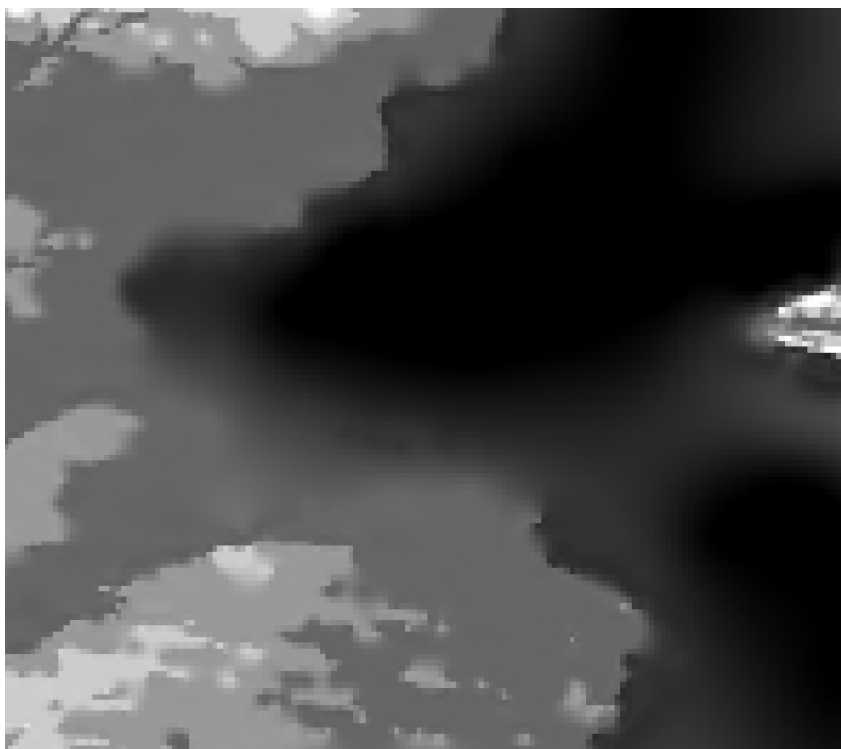


Рисунок 3.3.7 - Рельеф порта Сабетта, загруженный в рабочую директорию
QGIS

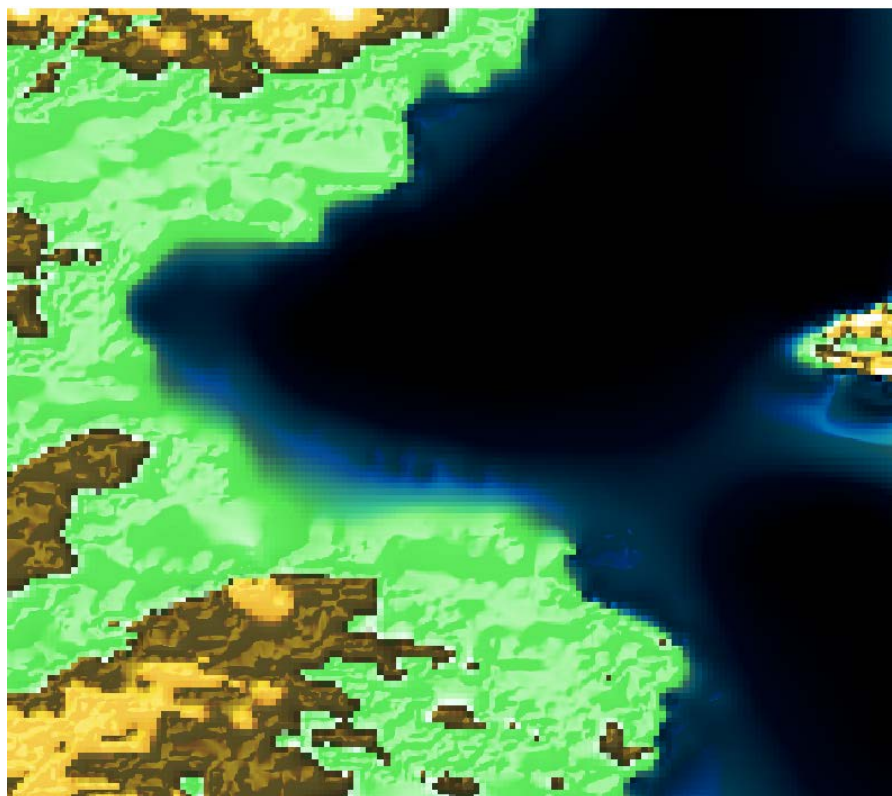


Рисунок 3.3.8 - Результат смешивания двух вариантов отображения слоя

Макет рельефа дна для порта Диксон:

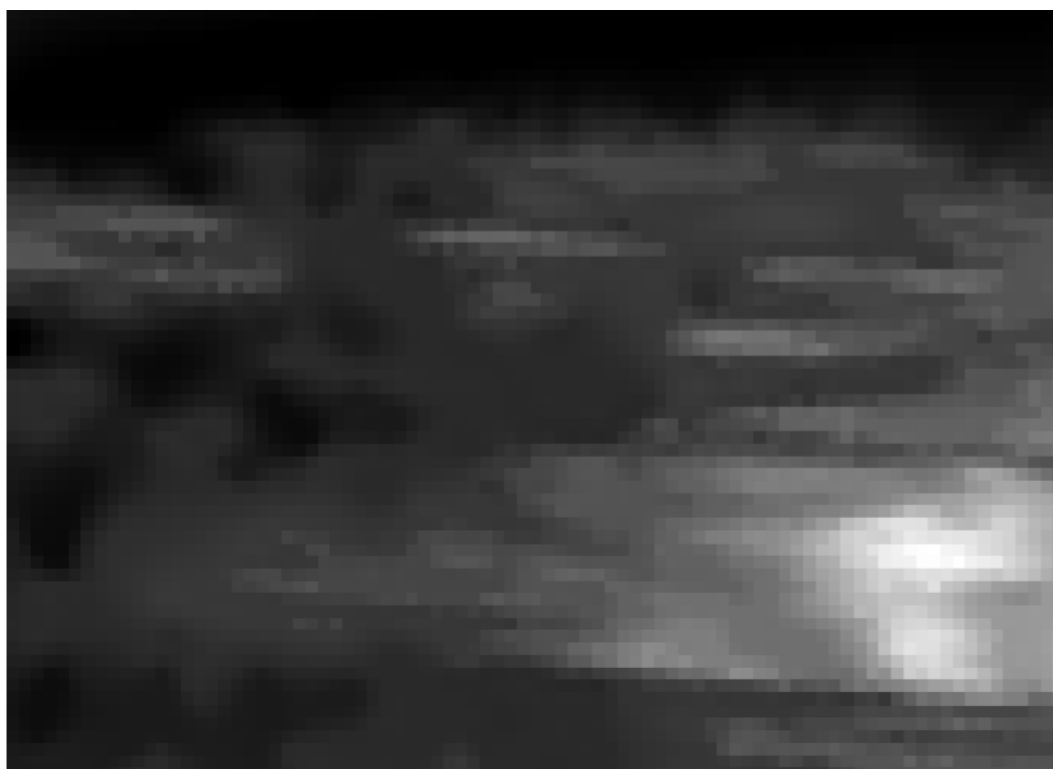


Рисунок 3.3.9 - Рельеф порта Диксон, загруженный в рабочую директорию
QGIS

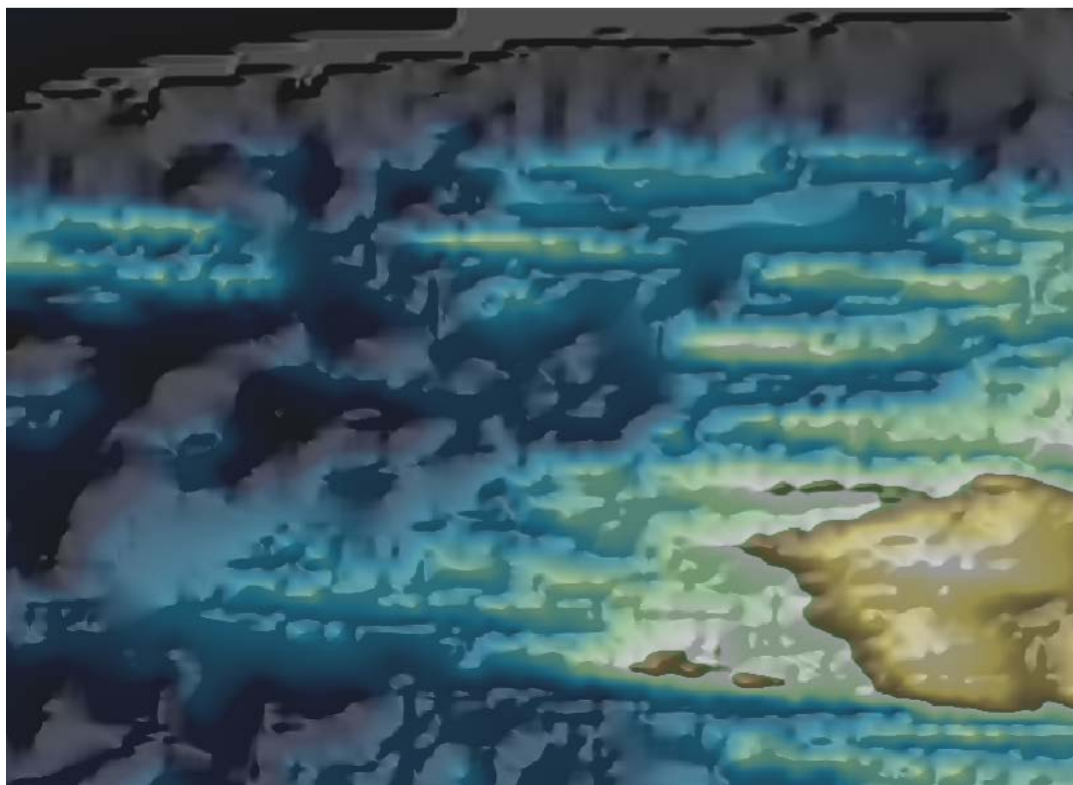


Рисунок 3.3.10 - Результат смешивания двух вариантов отображения слоя

Макет рельефа дна для порта Дудинка:

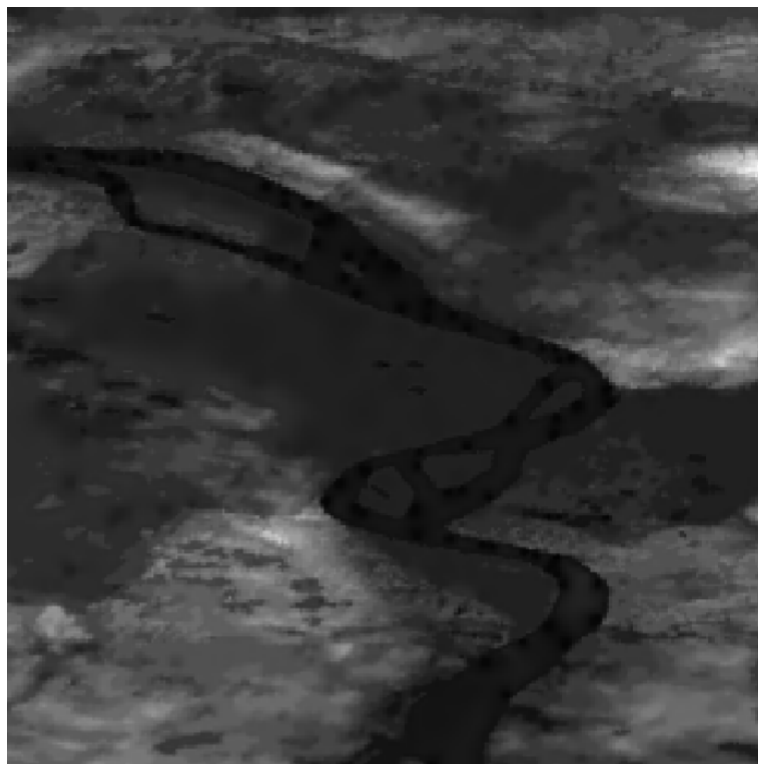


Рисунок 3.3.11 - Рельеф порта Дудинка, загруженный в рабочую директорию
QGIS

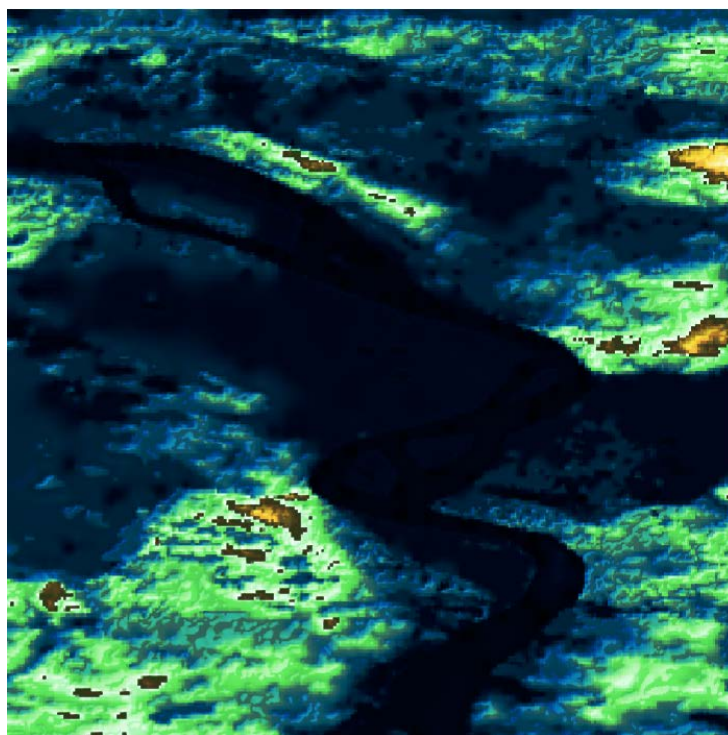


Рисунок 3.3.12 - Результат смешивания двух вариантов отображения слоя

3.4 Визуализация макетов, путём создания 3D моделей рельефа

Для создания 3D модели в QGIS есть специальный плагин «Qgis2threejs».

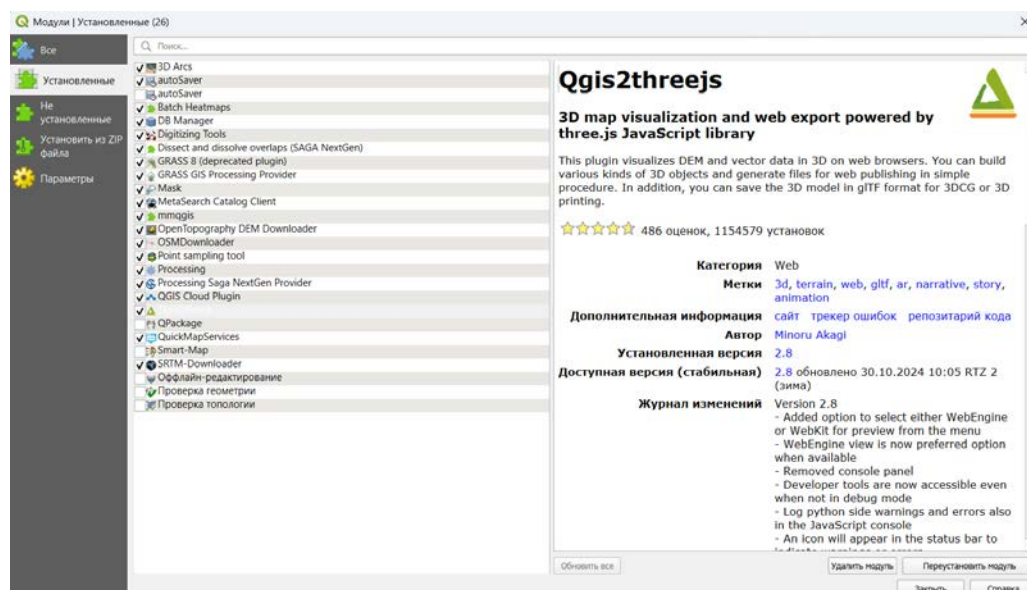


Рисунок 3.4.1

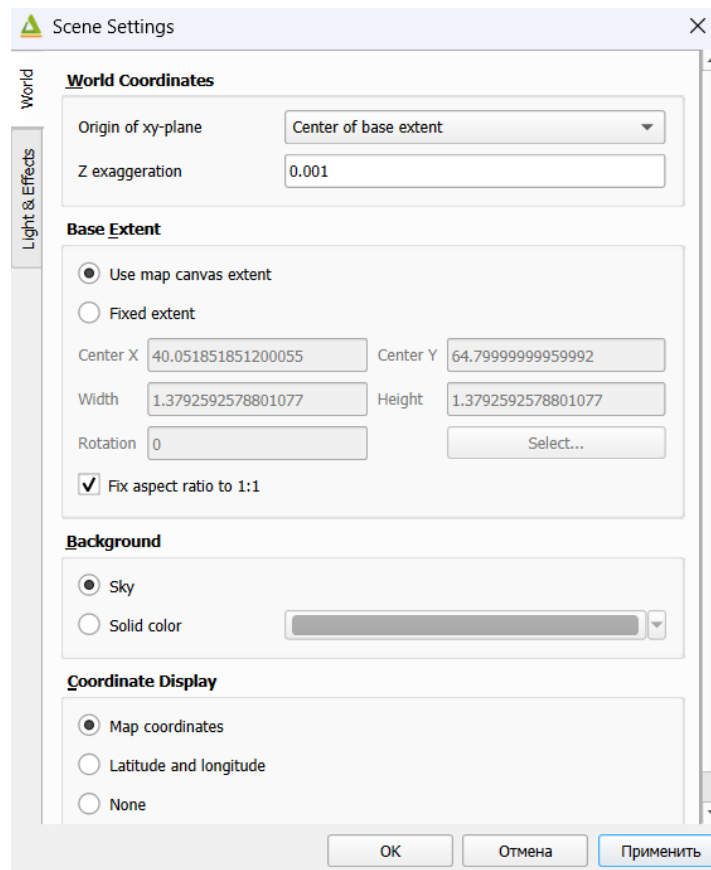


Рисунок 3.4.2

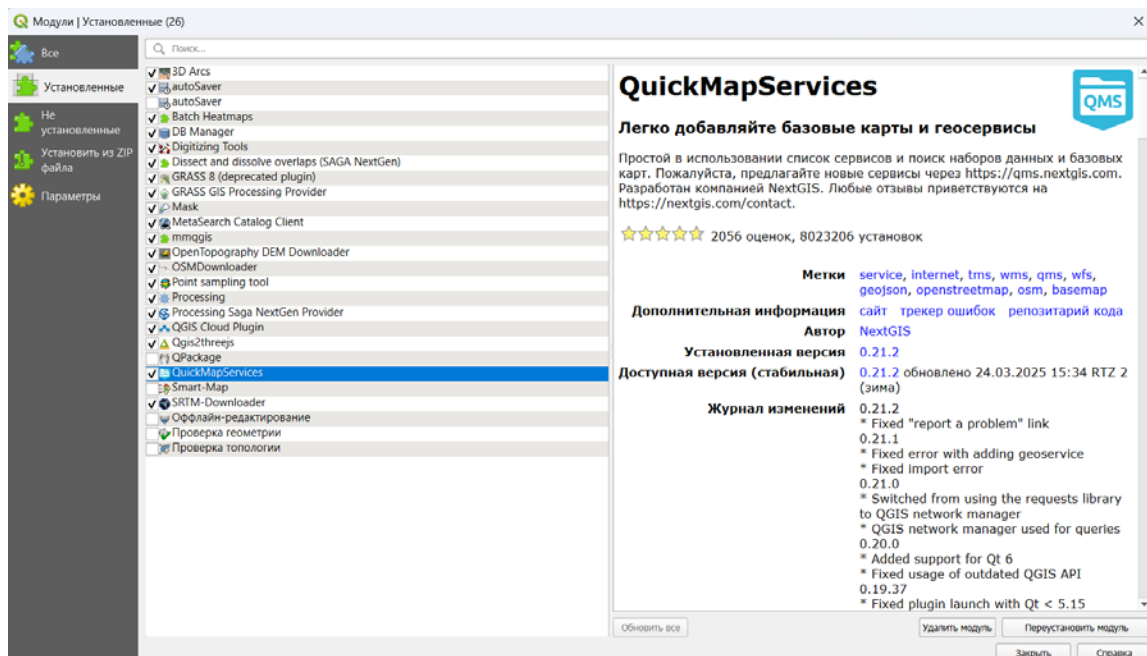


Рисунок 3.4.3

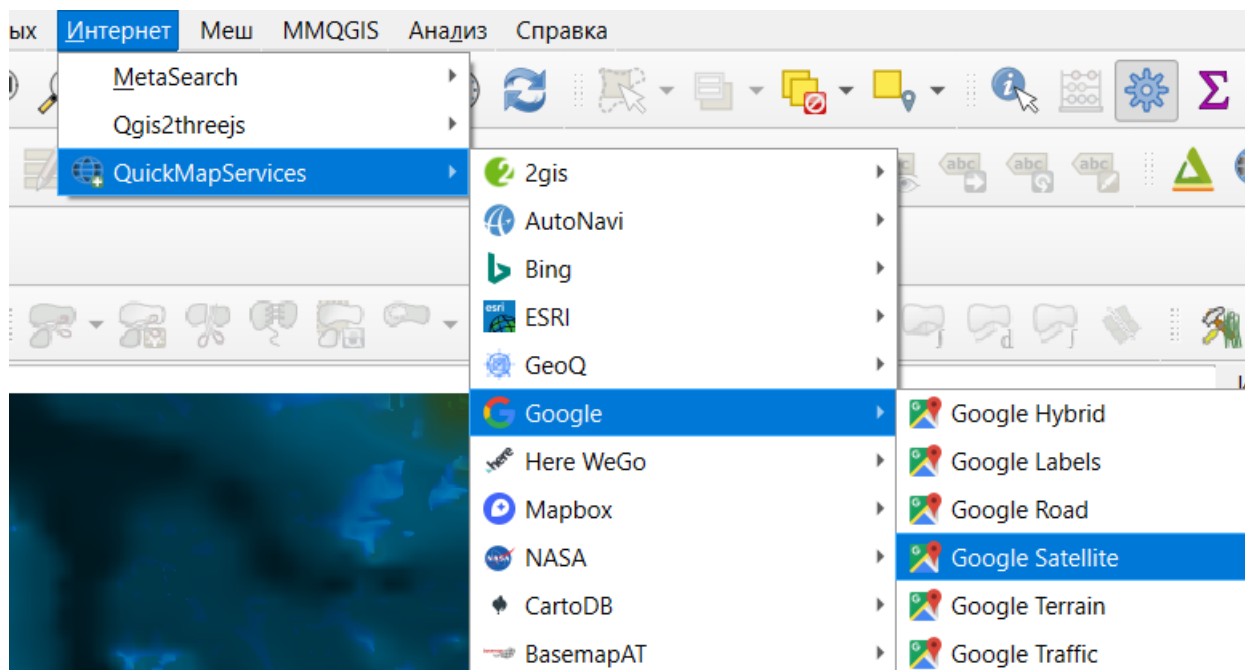


Рисунок 3.4.4 – Алгоритм подключения карт с помощью плагина QuickMapServices

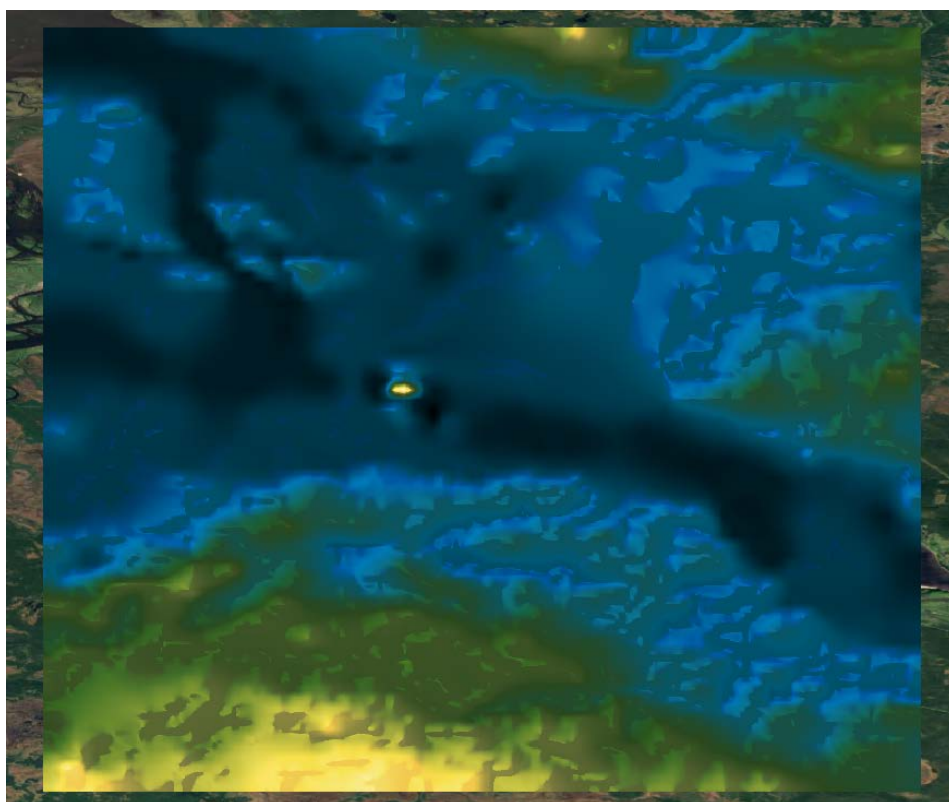


Рисунок 3.4.5 – Модель рельефа на карте мира (Архангельская область)

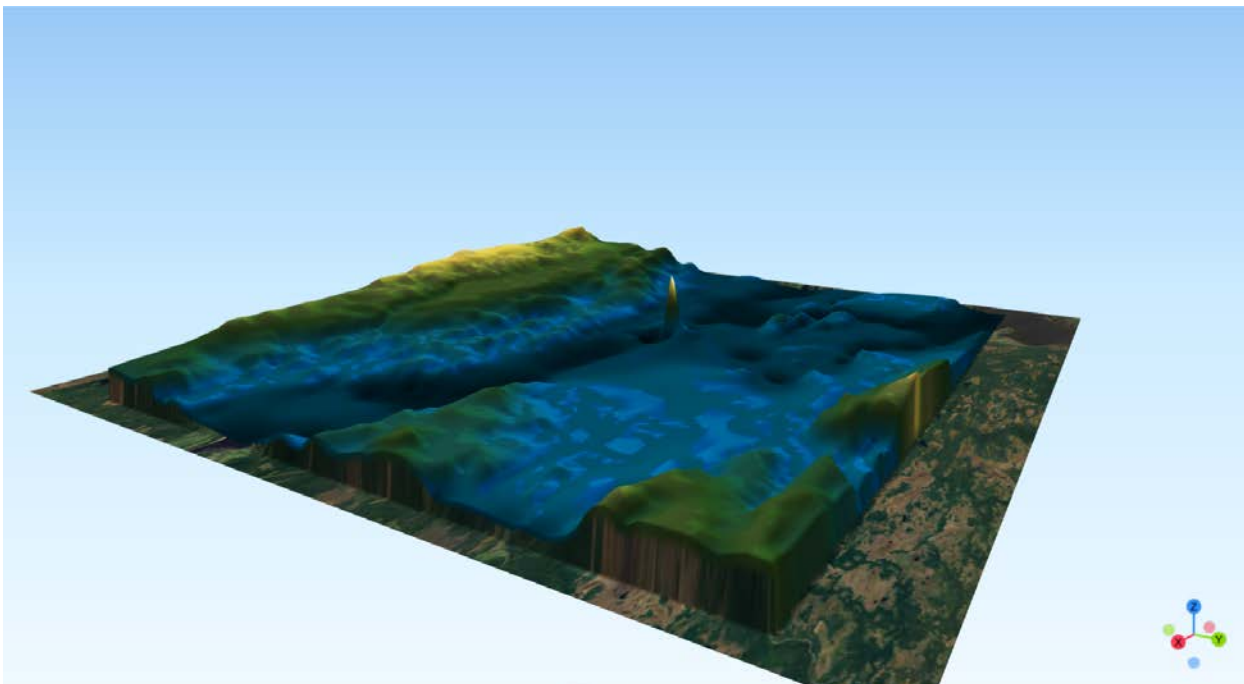


Рисунок 3.4.6 – 3D модель рельефа в районе порта Архангельск

Так же для улучшения отображения можно отключить слои, отображающие модель рельефа в рабочей директории QGIS. Результат отключения слоёв показан на рисунке 3.4.7.

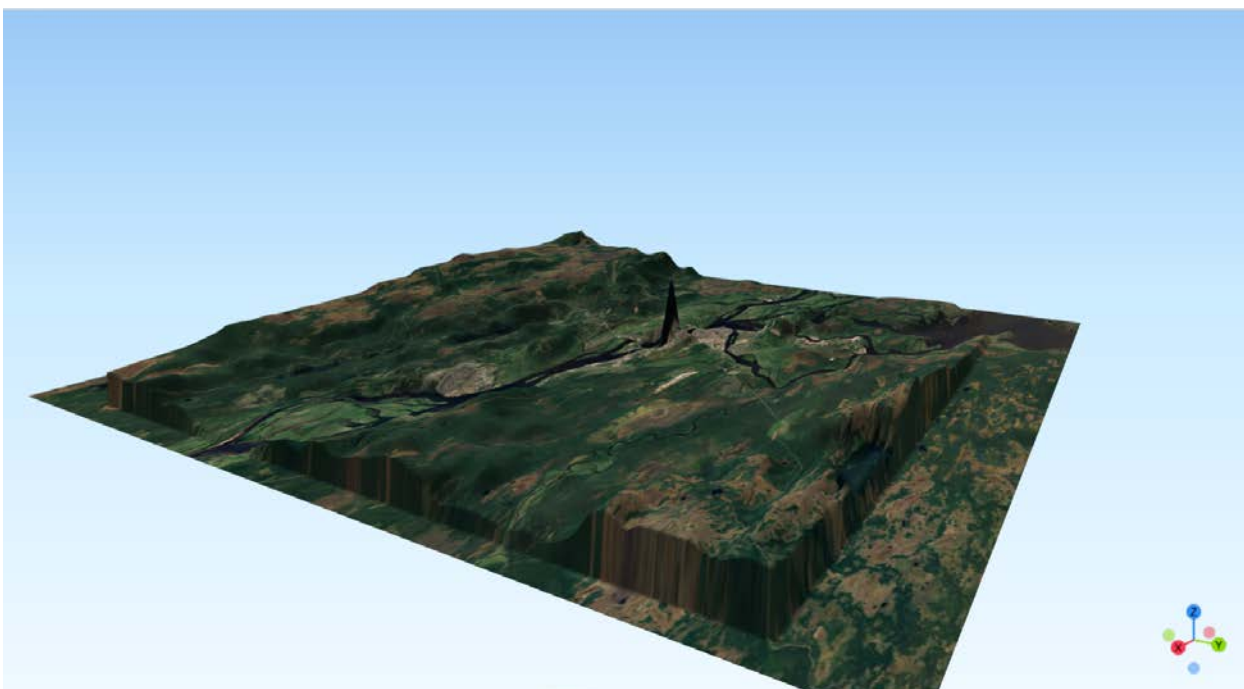


Рисунок 3.4.7 – 3D модель рельефа в районе порта Архангельск (с отключенными слоями)

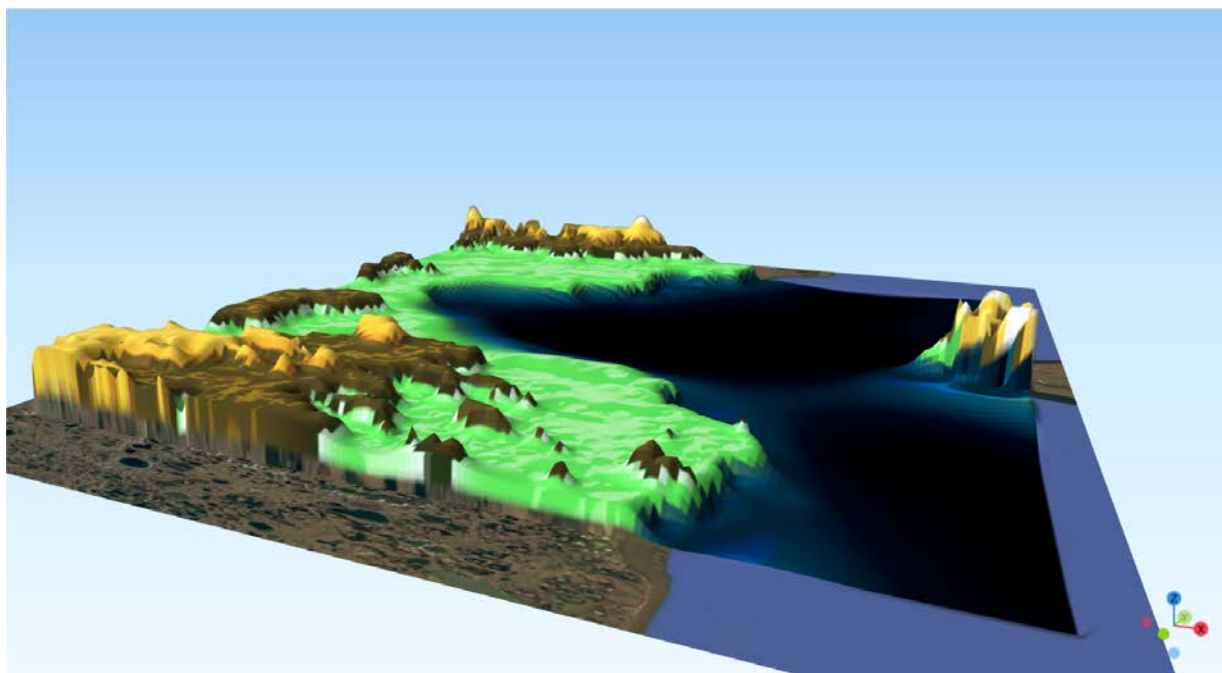


Рисунок 3.4.8 - 3D модель рельефа в районе порта Сабетта

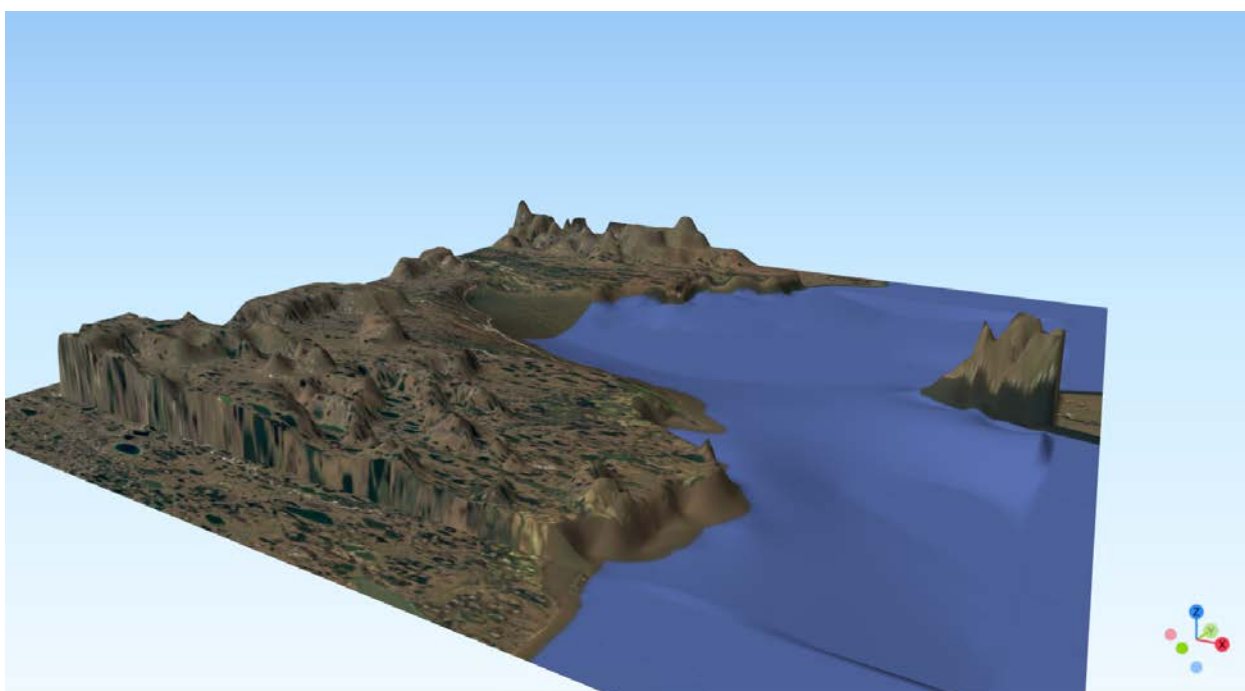


Рисунок 3.4.9 - 3D модель рельефа в районе порта Сабетта (с отключенными слоями)

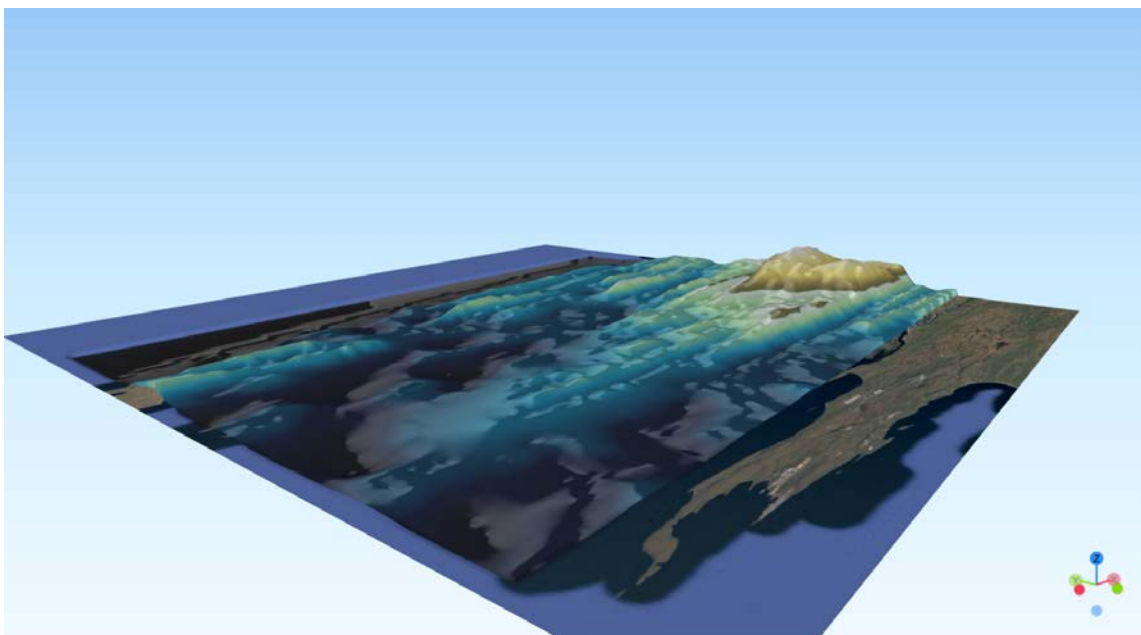


Рисунок 3.4.10 – 3D модель рельефа в районе порта Диксон

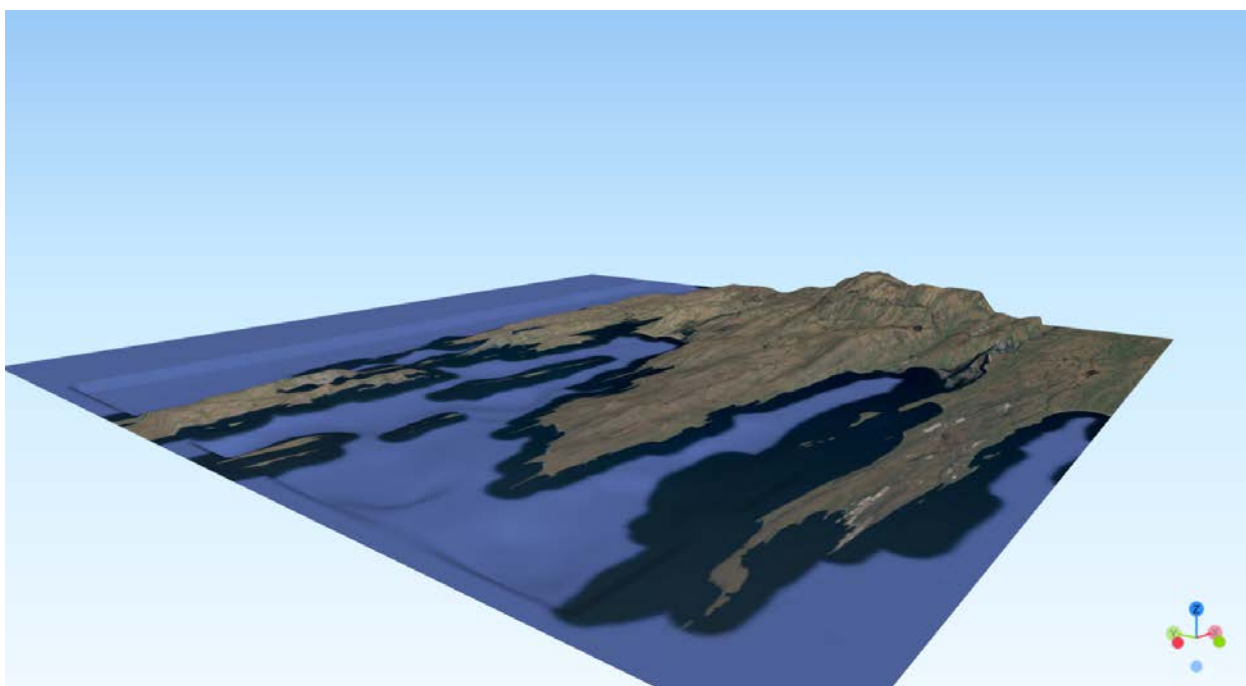


Рисунок 3.4.11 – 3D модель рельефа в районе порта Диксон (с отключенными слоями)

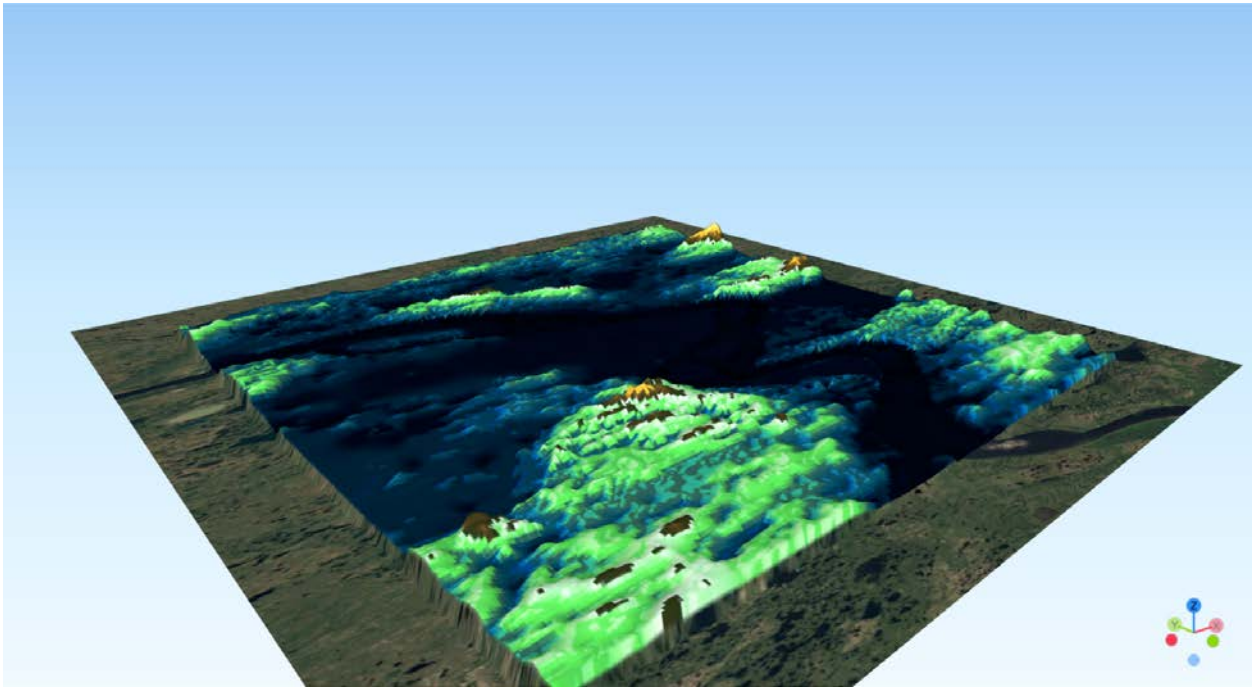


Рисунок 3.4.12 - 3D модель рельефа в районе порта Дудинка

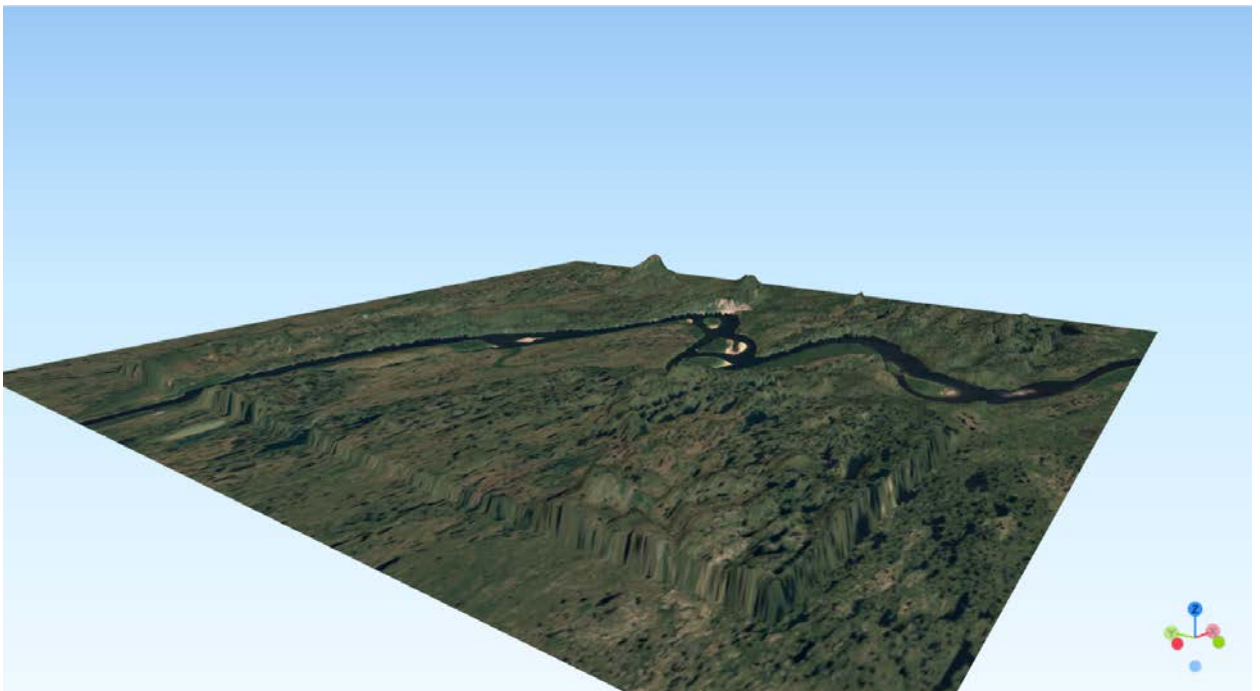


Рисунок 3.4.13 - 3D модель рельефа в районе Дудинка (с отключенными слоями)

3.5 Анализ полученных результатов

Представленные 3D модели рельефа местности в районе арктических портов были созданы с целью проведения гидрологического анализа. Гидрологический анализ, проведённый по полученным 3D моделями, включает в себя следующие 5 критериев:

1. Связь с температурными аномалиями – анализ высот помогает выявить зоны, наиболее подверженные потеплению;
2. Прогноз лавин и ледяных обвалов – ЦМР позволяет оценить крутизну склонов и устойчивость ледников;
3. Выявление зон подледниковых озёр – анализ рельефа помогает находить области возможного скопления воды подо льдом;
4. Выявление заторов и наледей – моделирование рельефа помогает предсказать места образования ледяных пробок;
5. Анализ ледовых условий;
6. Влияние особенностей рельефа на функционирование порта.

Таким образом, гидрологический анализ рельефа местности в районе порта Архангельск выглядит следующим образом:

1. Связь с температурными аномалиями

Рельеф в районе порта Архангельск имеет низменный характер (высоты от 0 до 20 м над уровнем моря).

Исследование цифровой модели рельефа (ЦМР) демонстрирует, что наиболее уязвимыми к потеплению являются обширные мелководные участки в устье Северной Двины. В летний сезон здесь наблюдается интенсивное нагревание воды, что способствует более быстрому таянию припайного льда и увеличению продолжительности навигационного периода.

В то же время, берега, сложенные из мягких пород, при повышении температуры становятся более подвержены термоабразии — процессу разрушения под влиянием волн и талых вод.

2. Прогноз лавин и ледяных обвалов

С помощью цифровой модели рельефа можно оценить устойчивость участков, подверженных ледяным обвалам и оползням, анализируя их уклон и геологическое строение.

В зимний период ледяные образования, такие как наплески и наледные поля, могут представлять опасность для судоходства и причальной инфраструктуры. Особенно опасны участки с резким перепадом глубин, где лёд под действием течений и приливов скалывается, образуя плавучие торосы.

При помощи регулярного мониторинга с использованием ЦМР можно прогнозировать ледовую обстановку и минимизировать риски для судоходства.

3. Выявление зон подледниковых озёр

При минусовых температурах, когда акватория порта покрывается льдом, под его поверхностью могут образоваться скопления талой воды, называемые подледниковыми озёрами. Они появляются из-за неравномерного нагрева льда и наличием источников тепла на дне. Исследование рельефа позволяет определить места, где могут образовываться такие озёра. Эти водные объекты опасны для судоходства и ледовых переправ, так как снижают прочность льда, а при резком спуске воды они могут повлечь за собой локальные затопления прибрежных участков.

4. Выявление заторов и наледей

В холодное время года в районе порта Архангельска одной из ключевых проблем являются ледяные заторы, которые формируются в местах, где русло реки сужается или где есть крутые повороты.

Используя цифровую модель рельефа, можно предсказывать эти области, анализируя наклон русла, ширину потока и наличие подводных преград.

Особенно опасны участки с обратным наклоном дна, где лёд собирается и образует заторы.

Кроме того, в мелководных районах в холодные зимние периоды образуются ледяные корки — слои льда, которые нарастают снизу из-за замерзания подземных вод. Они уменьшают глубину для судоходства и могут повредить дно судов.

Благодаря систематическому сбору информации о глубине и созданию моделей поведения льда можно минимизировать эти опасности. Это даёт возможность оперативно осуществлять ледокольные операции и работы по углублению дна.

5. Анализ ледового режима

Изучение трёхмерной цифровой модели рельефа позволяет обнаружить основные принципы формирования ледяного покрова в акватории порта Архангельск. Исследование демонстрирует, что процесс образования льда характеризуется ярко выраженной пространственно-временной динамикой, которая зависит от характеристик гидрографической сети и морфометрии дна.

В мелководных зонах Двинской губы и в устье Северной Двины наблюдается активное образование льда. В этих местах раннее формирование прочного ледяного покрова сопровождается высокой вероятностью появления торосов.

Создание цифровой модели рельефа дна и береговой линии помогает выявить участки, где существует опасность для судоходства, обусловленная изменениями в движении льда. Узкие фарватеры и участки с резкими перепадами глубин характеризуются неравномерным ледовым покровом и склонностью к образованию зажоров.

Особое значение имеет учёт преобладающих северо-восточных ветров, которые вызывают дрейф льда и его аккумуляцию в юго-западной части акватории порта, создавая дополнительную нагрузку на гидротехнические сооружения.

Пространственный анализ трёхмерной модели позволяет дифференцировать акваторию по срокам образования и разрушения льда. Установлено, что период ограничений навигации в порту Архангельск в

среднем длится с ноября по апрель, однако локальные особенности рельефа могут вызывать значительные отклонения от этих сроков на отдельных участках.

Полученные данные имеют практическое значение для оптимизации ледокольных операций и планирования зимней навигации.

Исследование подтверждает эффективность использования трёхмерного моделирования рельефа для прогнозирования ледовых условий. Разработанная методика может быть применена для создания системы оперативного мониторинга и управления ледовой обстановкой в порту, что позволит минимизировать экономические риски и повысить безопасность судоходства в зимний период.

6. Влияние особенностей рельефа на функционирование порта

Сочетание различных условий создаёт сложную обстановку для использования портовой инфраструктуры.

Из-за особенностей рельефа и изменений дна необходимо постоянно контролировать логистические маршруты и адаптировать их.

Аномалии температуры, хотя и продлевают навигационный период, увеличивают риск термоабразии берегов и нестабильности ледового покрова.

Подледниковые озёра и ледяные заторы создают дополнительные проблемы для зимнего судоходства. А подвижные отмели и наносы увеличивают расходы на поддержание глубины.

Для эффективного управления этими процессами нужно интегрировать данные ЦМР в систему гидродинамического моделирования. Это позволит оперативно реагировать на изменения и прогнозировать их долгосрочное развитие.

Особое внимание следует уделить участкам с наибольшей динамикой рельефа — устьевым отмелям, участкам с резкими перепадами глубин и береговым склонам, подверженным оползневым процессам.

Только комплексный подход, учитывающий как природные, так и антропогенные факторы, обеспечит стабильную работу порта Архангельск в условиях меняющейся среды.

Гидрологический анализ рельефа местности в районе порта Сабетта:

1. Связь с температурными аномалиями

В районе порта Сабетта гидрологические процессы тесно связаны с особенностями рельефа, который представляет собой низменную прибрежную равнину с абсолютными отметками от 5 до 15 метров. Равнина постепенно понижается в сторону Обской губы.

Из-за плоского характера местности формируется особый температурный режим. Летом обширные заболоченные территории и мелководная акватория активно накапливают тепло. Это приводит к интенсивному нагреву верхних слоёв почвы и ускоренной деградации многолетней мерзлоты. Особенно ярко это проявляется на участках с полигонально-жильными льдами. Там 3D-модель рельефа чётко фиксирует просадки поверхности, вызванные таянием подземных льдов.

Зимой же ровная поверхность тундры способствует формированию устойчивых температурных инверсий. Это необходимо учитывать при проектировании инфраструктуры.

2. Прогноз лавин и ледяных обвалов

Проведение исследований трёхмерной модели рельефа позволяет обнаружить потенциально опасные участки склонов, где могут произойти ледяные обвалы и снежные лавины.

Хотя перепады высот в районе порта невелики, на некоторых участках берегового склона, состоящего из рыхлых отложений четвертичного периода, крутизна склона достигает опасных значений.

В период весеннего таяния снега или летних дождей такие склоны становятся неустойчивыми. А наличие в их основании пластовых льдов увеличивает вероятность обвалов.

Особое внимание при моделировании уделяется участкам, где береговые обрывы соприкасаются с водой. Здесь волновая и ледовая абразия дополнительно снижают устойчивость склонов.

3. Выявление зон подледниковых озёр

Трёхмерное моделирование рельефа дна и пространства подо льдом позволяет с высокой точностью определить области, где могут образовываться подледниковые озёра. Эти водоёмы обычно формируются в углублениях рельефа под толщей ледника или многолетнего припая, где создаются условия для накопления талых вод.

В районе Сабетты такие озёра чаще всего встречаются в древних термокарстовых впадинах на побережье и в локальных углублениях на дне Обской губы. Их своевременное обнаружение имеет решающее значение для безопасной эксплуатации порта в зимний период, поскольку прорыв таких озёр может привести к внезапным затоплениям и деформациям портовых сооружений.

4. Выявление заторов и наледей

Специфика рельефа дна Обской губы играет ключевую роль в формировании ледовых заторов и наледей. Исследование ЦМР показало, что наиболее опасными зонами являются зоны с внезапным изменением глубины и ширины русла, там, где формируются предпосылки для образования ледяных скоплений.

Во время весеннего половодья угрозу представляют участки с обратным наклоном дна. Они могут привести к образованию мощнейших заторов.

Благодаря использованию ЦМР можно обнаружить на побережье места, где могут образовываться наледи. Чаще всего это дно балок и лощин, где зимой скапливается вода, которая замерзает и образует мощные ледяные массы.

5. Анализ ледового режима

Исследование ледовой обстановки с использованием ЦМР позволяет получить достаточную информацию о формировании и изменении ледового покрова.

Мелководные районы и побережье покрываются льдом раньше, создавая прочный припай, которые может достигнуть двух метров в толщину. Глубоководные подходные каналы и акватория порта подвержены влиянию дрейфующих льдов, поступающих из Карского моря, что создаёт дополнительные сложности для навигации.

Важную роль играет анализ воздействия ветра на ледовые условия. Преобладание северных и северо-восточных ветров способствует нагону льдов из открытой части Карского моря, создавая зоны повышенной концентрации льда у причальных сооружений. В период зимних штормов наблюдаются интенсивные подвижки льда, приводящие к образованию торосов высотой до трёх-четырёх метров, особенно в районе подходного канала.

Ледовый период в порту Сабетта длится с октября по июнь, достигая максимальной интенсивности в январе-марте. Использование трёхмерной модели позволяет выявить зоны раннего формирования льда в защищённых бухтах и участки позднего очищения ото льда в районе судоходного пути. Наибольшую опасность для судоходства представляют зоны смешения речных и морских вод, где образуются сложные ледовые образования с включениями шуги и наледей.

Применение трёхмерного моделирования рельефа акватории порта Сабетта позволяет оптимизировать ледокольные операции и минимизировать риски для портовой инфраструктуры. Полученные данные позволяют прогнозировать образование ледовых заторов у причальных стенок и разрабатывать превентивные меры по защите гидротехнических сооружений. Результаты исследования имеют большое значение для обеспечения безопасной работы порта в экстремальных арктических условиях.

6. Влияние особенностей рельефа на функционирование порта

Работа порта Сабетта во многом определяется гидрологическими условиями, связанными с особенностями местности.

Равнинный рельеф прибрежной территории затрудняет естественный сток воды, поэтому необходимо применять специальные технические решения для отвода талых и дождевых вод.

В зоне порта под водой есть большие участки с небольшой глубиной и подвижные отмели. Из-за этого нужно постоянно углублять дно и менять маршруты для кораблей.

В зависимости от особенностей рельефа местности, криогенные процессы могут представлять угрозу для устойчивости портовых конструкций. Это следует принимать во внимание при разработке проектов и в процессе эксплуатации.

В условиях Арктики регулярный мониторинг изменений рельефа с применением современных трёхмерных технологий становится ключевым аспектом эффективного управления портовой инфраструктурой.

Гидрологический анализ рельефа местности в районе порта Диксон:

1. Связь с температурными аномалиями

В районе порта Диксон гидрологический режим определяется специфическими арктическими условиями и особенностями ландшафта.

Исследование ЦМР показало пологие береговые территории, которые находятся на высоте от 10 до 30 метров над уровнем моря и крутые скальные уступы, высота которых варьируется от 80 до 100 метров.

Из-за такой разницы в высоте появляется заметный эффект температурной инверсии (в низинах копится холодный воздух, образуя стабильные области холода, а на возвышенностях преобладает ветер и колебания температуры ощущаются сильнее). Особенно заметно это зимой, когда разница температур на прибрежной равнине и на высокогорным плато может варьироваться от 10 до 15 градусов Цельсия.

2. Прогноз лавин и ледяных обвалов

С помощью ЦМР можно выявить несколько участков, где есть вероятность образования ледяных глыб и схода снежных лавин.

Особенно опасными являются крутые склоны, которые расположены на северо-западе и состоят из коренных пород с вкраплениями пластового льда. В период летнего таяния эти склоны становятся особенно неустойчивыми.

Анализ трёхмерной модели рельефа показывает, что на этих участках есть характерные особенности: ниши выветривания и трещины отрыва. Они указывают на то, что в этих местах могут произойти обвалы.

Зимой на подветренных склонах накапливается большое количество снега. Это может привести к формированию снежных досок, которые представляют опасность для объектов инфраструктуры, расположенных у подножия склонов.

3. Выявление зон подледниковых озёр

Использование методов трёхмерного моделирования позволяет с высокой точностью определить области, где могут формироваться подледниковые озёра в районе Диксона.

Такие водоёмы обычно образуются в тектонических впадинах и древних цирках на склонах холмов, где создаются условия для накопления талой воды под ледниковым покровом.

Особое внимание при исследовании уделяется участкам, где ледники соприкасаются с морской водой. В таких местах могут образовываться подпрудные озёра, которые при прорыве могут вызвать резкий подъём уровня воды в прибрежной зоне.

В летние тёплые периоды эти процессы активизируются, что увеличивает риски для прибрежной инфраструктуры.

4. Выявление заторов и наледей

Специфика рельефа морского дна в районе порта Диксон играет ключевую роль в формировании ледовых заторов и наледей. Трёхмерная

батиметрическая модель демонстрирует сложную систему подводных гряд и впадин, которые влияют на движение льдов.

Наиболее опасными для судоходства являются участки с резким изменением глубины у входа в гавань. В период осеннего ледообразования здесь формируются многослойные скопления льда.

Трёхмерный анализ позволяет определить зоны образования мощных береговых наледей. Обычно они формируются в устьях временных водотоков и у подножия террас. В этих местах напорные грунтовые воды создают условия для формирования толстого льда, достигающего 3–4 метров.

5. Анализ ледового режима

Трёхмерная цифровая модель акватории порта Диксон позволяет детально изучить особенности ледового режима в условиях высоких широт Арктики. Глубоководный порт, расположенный в сложной прибрежной зоне, создаёт уникальные условия для формирования и перемещения льдов.

Анализ модели показывает, что устойчивый ледяной покров устанавливается в середине сентября и сохраняется до конца июня, достигая максимальной толщины 1,5–2 метра в защищённых бухтах.

Анализ трёхмерной модели показывает, что ледовая обстановка сильно зависит от направления ветра. Преобладающие северо-западные ветры Карского моря вызывают интенсивное перемещение многолетних льдов в акваторию порта, создавая опасные зоны для судоходства.

Особую проблему представляют торосы, которые формируются у восточного побережья острова Диксон. Из-за перепада глубин там накапливаются большие массы льда. В период с ноября по май движение льда представляет постоянную угрозу для портовых сооружений.

Использование цифровой модели рельефа позволяет выделить несколько характерных зон ледового режима. Западная часть акватории, открытая к Карскому морю, имеет наиболее сложные ледовые условия с частыми подвижками льда. Восточные бухты, защищённые береговым

рельефом, формируют более стабильный ледяной покров, но с повышенной торосистостью.

Особого внимания требует фарватер входа в порт, где сочетание течений и ветра создаёт сложную динамику льда.

Исследование имеет практическое значение для прогнозирования нагрузки на портовые сооружения и оптимизации ледокольных операций. Трёхмерная модель позволяет определить участки потенциального образования ледовых заторов и разработать меры по защите инфраструктуры порта.

Полученные данные особенно важны для планирования навигации в короткий летний период, когда точный учёт особенностей рельефа может значительно повысить безопасность судоходства в условиях частичного ледяного покрова.

6. Влияние особенностей рельефа на функционирование порта

Работа порта Диксон в суровых условиях Арктики во многом определяется спецификой рельефа.

Крутые скальные склоны, которые окружают портовую зону, создают сложную систему воздушных потоков, что влияет на безопасность судоходства и работу подъёмных кранов.

Резкие перепады глубин на дне моря создают сложную ледовую обстановку в период навигации, что требует постоянного присутствия ледоколов.

Криогенные процессы, которые зависят от особенностей микрорельефа, вызывают неравномерные деформации грунта под фундаментами сооружений.

Все эти особенности делают регулярный мониторинг изменений рельефа с использованием современных технологий 3D-сканирования ключевым элементом системы управления портовым хозяйством. Что даёт возможность предсказывать опасности и разрабатывать стратегии реагирования.

Гидрологический анализ рельефа местности в районе порта Дудинка:

1. Связь с температурными аномалиями

В районе порта Дудинка создаются уникальные гидрологические условия из-за сложного взаимодействия речных и морских сил.

ЦМР показывает, что берег Енисея отличается по высоте. Правый берег достигает 50 метров над уровнем моря, в то время как левый остаётся низким. Это влияет на температурный режим.

В летний период южные склоны правого берега нагреваются интенсивнее, чем северные, на 3-5 градусов. Это влечёт за собой активное таяние многолетней мерзлоты и способствует развитию термокарстовых процессов.

2. Прогноз лавин и ледяных обвалов

Исследование цифровой модели рельефа на правом берегу позволяет обнаружить несколько потенциально опасных зон, где возможны ледяные обвалы и оползни.

Крутые склоны с уклоном от 25 до 35 градусов, состоящие из делювиальных отложений с вкраплениями погребённого льда, становятся особенно опасными в период весеннего таяния снега.

Особую тревогу вызывают участки с выраженными нишами выветривания и трещинами отрыва в верхней части склонов. С помощью трёхмерного моделирования можно предсказать возможный объём обвальных масс.

Зимой на подветренных склонах образуются снежные карнизы, которые могут вызвать сход снежных лавин при резком повышении температуры.

3. Выявление зон подледниковых озёр

Использование технологий трёхмерного моделирования в акватории Енисейского залива помогает определить области, где могут образовываться водоёмы подо льдом.

Наиболее вероятными местами для их формирования являются древние русла рек на дне залива и карстовые воронки в прибрежной зоне.

Особое внимание уделяется участкам с необычными глубинами и специфическими формами дна, которые могут указывать на наличие подземных полостей.

В период весеннего таяния льда такие водоёмы подо льдом могут стать причиной внезапных выбросов воды и льда, что создаёт дополнительную угрозу для судоходства.

4. Выявление заторов и наледей

Специфика рельефа дна Енисея в районе Дудинки играет ключевую роль в формировании ледовых заторов. Трёхмерная батиметрическая модель показывает ряд подводных отмелей и перекатов, которые становятся естественными центрами образования льда в начале зимы.

Наиболее сложные участки — это места с резким изменением продольного профиля дна, где создаются условия для формирования многослойных ледовых пробок толщиной до 3–4 метров.

В прибрежной зоне трёхмерный анализ позволяет обнаружить участки образования береговых наледей, связанных с выходом напорных грунтовых вод у подножия террас и в устьях небольших рек.

5. Анализ ледового режима

Трёхмерная цифровая модель рельефа акватории порта Дудинка предоставляет возможность детально проанализировать уникальные ледовые условия, характерные для устья Енисея.

Этот район отличается сложным взаимодействием речного стока с морскими водами Карского моря, что влияет на динамику формирования льда. Моделирование показывает, что замерзание начинается в середине октября. Наиболее активное образование льда происходит в мелководных протоках дельты Енисея, где к февралю его толщина достигает 1,8–2,2 метра.

Анализ трёхмерной модели демонстрирует, что рельеф дна значительно влияет на распределение ледового покрова. В верхнем течении реки, где фарватер узок и извилист, лёд формируется раньше, а у берегов возникают

мощные нависающие края. В районе морского порта приливные течения даже зимой создают полыньи и зоны с разрежённым льдом.

Особую угрозу представляют ледовые заторы, которые формируются весной во время паводка, достигая высоты 10–12 метров.

Цифровое моделирование позволяет выделить три основные зоны с различными ледово-климатическими режимами. В верхнем течении реки лёд относительно стабилен, но в местах сужения русла образуются торосы. Центральная часть порта подвержена постоянным подвижкам льда из-за течений и работы ледоколов. Морской подходной канал характеризуется сложным взаимодействием речного и морского льда, что создаёт зоны повышенного риска в местах резкого изменения глубин.

Практическая значимость исследования заключается в возможности прогнозирования опасных ледовых ситуаций, особенно во время осеннего ледостава и весеннего ледохода. Трёхмерная модель помогает оптимизировать маршруты ледокольных судов, минимизировать риски для гидросооружений и планировать зимнюю навигацию. Полученные данные особенно важны для организации грузоперевозок в условиях короткого навигационного сезона, который обычно длится с июня по октябрь.

6. Влияние особенностей рельефа на функционирование порта

Работа порта Дудинка в условиях Крайнего Севера во многом зависит от особенностей ландшафта.

Высокий правый берег естественным образом защищает портовые сооружения от нагонных явлений, но при этом создаёт трудности для транспортной инфраструктуры, которой приходится преодолевать значительные перепады высот.

Подводный рельеф с обширными мелководными участками и постоянно меняющимися песчаными косами требует регулярного углубления дна и корректировки судоходных маршрутов.

Криогенные процессы, интенсивность которых зависит от микрорельефа территории, вызывают неравномерные деформации грунтов под причальными сооружениями.

Все эти факторы делают регулярный мониторинг изменений ландшафта с использованием трёхмерных технологий важным элементом системы управления портовым хозяйством.

Практические рекомендации:

Предлагаемая модель позволяет:

- оценивать динамику процессов, связанных с ледяным покровом (образование, таяние, перемещение и деформация), на основе данных, полученных со спутников, метеорологических параметров и гидрологических измерений;

- прогнозировать изменения в ледовом режиме с учётом сезонных колебаний температуры, течений и ветровой нагрузки, а также антропогенных факторов;

- анализировать гидрологическую обстановку, включая уровень воды, солёность, скорость и направление течений, их влияние на ледовые процессы и взаимодействие с другими элементами экосистемы;

- выявлять аномальные явления (раннее замерзание, нестабильность ледового поля, образование торосов) для оперативного мониторинга и принятия решений;

- оценивать воздействие ледовых процессов на инфраструктуру (порты, мосты, подводные коммуникации) и планировать мероприятия по их защите.

Модель предназначена для использования в арктических и субарктических регионах, таких как Северный Ледовитый океан. Но она может быть адаптирована для других областей. Модель может быть применена: в шельфовых зонах (Карское море, море Лаптевых, Восточно-

Сибирское море и др.); в устьевых участках рек с сезонным ледоставом (места впадения крупных рек); в закрытых водоёмах.

Для успешного применения модели в новых регионах необходимо провести её адаптацию с учётом локальных условий.

Варианты модификации для других акваторий:

- Для южных морей с тонким льдом. Необходимо уменьшить пороговые значения прочности льда, чтобы модель корректно учитывала особенности ледяного покрова в этих регионах.

- В зонах с сильными течениями. Например, в Баренцевом море, где наблюдаются интенсивные морские течения, модель должна включать модуль адвекции льда, учитывающий его перемещение под воздействием течений.

- Для морских акваторий с приливами и отливами. Важно интегрировать данные о приливных колебаниях, чтобы более точно прогнозировать динамику ледового покрова в таких условиях.

- Для регионов с антропогенными факторами. В транспортных акваториях, где осуществляется судоходство или проводятся ледокольные операции, модель должна учитывать воздействие судов и ледоколов на ледовые процессы.

- Для экосистем с высокой биологической активностью. Крайне значимо принимать во внимание воздействие ледовых явлений на морские биосистемы, включая перемещения живых организмов и состояние биологических ресурсов.

Модификация под новые регионы:

- Для адаптации модели под новые регионы необходимо учитывать локальные климатические условия, особенности ледового покрова, интенсивность течений, а также антропогенные факторы.

- При разработке модификации модели важно проводить её калибровку на основе данных, собранных в конкретном регионе.

- По мере накопления данных о ледовых процессах в новых регионах модель можно дополнительно уточнять и улучшать.

Применение модели на практике.

В сфере управления судоходством модель может поспособствовать разработке стратегии зимней навигации, установлению оптимальных временных рамок для проводки судов и оценки необходимости в услугах ледоколов.

В проектировании и строительстве портовой инфраструктуры модель может быть использована для разработки новых причальных сооружений. Существующие сооружения могут исследоваться на устойчивость к воздействию льда, что может помочь выявить слабые места.

Модель можно модифицировать путём связывания её с системами контроля, которые включают в себя информацию, полученную со спутников, и данные от гидрологических станций.

Так же, можно разработать мобильное приложение для капитанов и работников портов, которое будет предоставлять актуальную трёхмерную визуализацию навигационных условий.

Исследование демонстрирует, что 3D-моделирование может стать эффективным инструментом для контроля ледовой обстановки в арктических портах. Применение этой технологии повышает безопасность судоходства, оптимизирует работу портов и снижает риски для инфраструктуры.

Дальнейшее развитие проекта должно быть сосредоточено на улучшении алгоритмов прогнозирования и расширении возможностей для комплексного решения проблем арктического судоходства.

Выводы по главе: в рамках третьей главы выпускной квалификационной работы были созданы 3D модели рельефа местности в районе арктических портов и, по полученным моделям, был проведён гидрологический анализ.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель — создана трёхмерная цифровая модель рельефа в районе арктических портов. Это позволило провести гидрологический анализ и оценить, как ледовые условия влияют на судоходство и портовую инфраструктуру.

В ходе исследования были решены ключевые задачи:

- изучение современного состояния Арктики;
- анализ доступности данных дистанционного зондирования;
- оценка климатических условий портов Северного морского пути;
- сравнительный анализ портов и разработка рекомендаций по их развитию.

Результаты исследования показали, что ледовый режим остаётся ключевым фактором, определяющим безопасность судоходства и экономическую эффективность арктических портов. Сокращение ледового покрова, увеличение безледного периода и рост экстремальных явлений требуют адаптации логистических стратегий и инфраструктуры.

Разработанная трёхмерная модель рельефа может стать основой для дальнейших исследований, включая прогнозирование ледовой обстановки, оптимизацию ледокольного сопровождения и проектирование устойчивых портовых объектов.

Несмотря на то, что задачи были выполнены, тема остаётся актуальной в свете климатических изменений и роста арктического судоходства. Перспективными направлениями для будущих исследований могут стать:

- более глубокий анализ локальных ледовых условий с использованием методов машинного обучения;
- разработка динамических моделей для прогнозирования аварийных ситуаций;

- оценка экономических рисков, связанных с таянием вечной мерзлоты и изменением ледовитости.

Таким образом, работа вносит вклад в понимание ледовых режимов арктических портов, сочетая научную значимость с практическими приложениями для устойчивого развития региона.

Так же, результаты работы были представлены на конференции «ИНФОГЕО-2024», что подтверждается публикацией.

Список используемых источников

1. Абрамов Р.С., Сычев В.Л. Климатические условия арктических портов России // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 67-78.
2. Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В. Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике. Лёд и Снег. 2017;57(3):381-390.
3. Анализ потенциала арктического судоходства // pro-arctic URL: <https://pro-arctic.ru/15/04/2015/expert/15541> (дата обращения: 23.02.2025).
4. Бесплатные геоинформационные решения QGIS и NextGIS // Хабр URL: <https://habr.com/ru/articles/321710/> (дата обращения: 19.12.2024).
5. Встреча #ИМО: Будет ли действовать саммит по судоходству для защиты # Арктики от разливов и выбросов? // eureporter URL: <https://ru.eureporter.co/frontpage/2020/02/17/imo-meeting-will-shipping-summit-act-to-protect-arctic-from-spills-and-emissions/> (дата обращения: 23.02.2025).
6. Грузооборот в порту Мурманска за год упал на 11% // rbc.ru URL: <https://murmansk.rbc.ru/murmansk/13/12/2024/675beec9a7947036f3e80dc> (дата обращения: 31.01.2025).
7. Глобальное потепление — это реальность»: директор ААНИИ — о влиянии климатических изменений на Северный морской путь // RT URL: <https://russian.rt.com/science/article/1209044-severnyi-morskoi-put-intervyu-klimat> (дата обращения: 23.02.2025).
8. Думанская И.О, Котилевская А.М. Оценка возможности использования прогностических методик XX века в современной практике ледового обслуживания мореплавания на неарктических морях России. - М.: Просвещение, 2022. - 19 с.
9. Дробжева Я.В., Волобуева О.В. Особенности метеорологического обеспечения авиации в арктической зоне: Учебное пособие. - СПб.: Полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. - 76 с.

10. Егiazаров Г.Е., Якимов В.В. Обеспечение безопасности эксплуатации судов в ледовых условиях: вызовы и возможности цифровой реальности. Часть 1 // Морской вестник. - 2021. - №4 (80). - С. 1-5.
11. Заболотских Е.В., Хворостовский К.С., Балашова Е.А., Азаров С.М., Кудрявцев В.М. Изменчивость морского льда в Арктике по данным Арктического портала // Лёд и снег. - 2020. - №2. - С. 239-250.
12. Загорский А.В. Безопасность в Арктике. - М.,: ИМЭМО РАН, 2019. - 114 с.
13. Иванова Е.А., Морозов П.К. Адаптация портовой инфраструктуры к арктическим условиям // Арктика: экология и экономика. 2021. № 3. С. 34-45.
14. Иванова М. В. Оценка возможности развития арктических коммуникаций в акватории Северного морского пути // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2021 № 2 С. 35-45.
15. История Северного Морского Пути // ECO Shipping URL: <https://ecoshp.ru/blog/istoriya-severnogo-morskogo-puti/> (дата обращения: 31.01.2025).
16. Как изменение климата Арктики меняет будущее нашей планеты // Новости мира и инноваций URL: <https://innovanews.ru/info/news/ecology/kak-izmenenie-klimata-arktiki-menjaet-budushhee-nashejj-planety/> (дата обращения: 14.01.2025).
17. Как изменение климата влияет на навигацию Северного морского пути // Трудовая оборона URL: <https://oborona.media/northern-sea-route-climate/> (дата обращения: 23.02.2025).
18. Какой климат и погода в Арктике по месяцам // Клуб полярных путешествий URL: <https://polartravelclub.ru/info-for-travelers/articles/klimat-arktiki/> (дата обращения: 14.01.2025).
19. Как обледенение топит корабли? // iXBT Live URL: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/kak-holod-soprovozhdaemyy-vetrom-topit-korabli.html> (дата обращения: 23.02.2025).

20. Климат и гидрология арктических морей России / Под ред. А.В. Фролова. СПб.: Гидрометеиздат, 2018. 312 с.
21. Кравчишин, Д. Б. Судовождение в условиях ограниченной видимости / Д. Б. Кравчишин, Н. В. Поздняков. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2024. — № 52 (551). — С. 44-47.
22. Козлов Д.В. Инженерные решения для арктических портов. М.: МГУ, 2023. 210 с.
23. «Ледоколы и не только»: Что нужно для развития Северного морского пути // Комсомольская правда URL: <https://www.kp.ru/online/news/5452624/> (дата обращения: 23.02.2025).
24. Лупачёв В.В., Кубасов Р.В., Богданов Р.Б. Влияние климатогеографических условий на состояние здоровья моряков во время рейса // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. - 2015. - №3. - С. 30-35.
25. Мавь Н.С. Открытые стандарты OGC для сетевого распространения геоданных // Земля из космоса. - 2011. - №11. - С. 31-35.
26. Макаров А.С., Миронов Е.У., Иванов В.В., Юлин А.В. Ледовые условия морей Российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году // Океанология. - 2022. - №6 (62). - С. 845-856.
27. Мониторинг Северного Морского пути // иннотер URL: <https://innoter.com/articles/monitoring-severnogo-morskogo-puti/> (дата обращения: 12.02.2025).
28. Морской порт САБЕТТА // Гидрографическое предприятие Росатом URL: https://rosatomport.ru/port_sabetta (дата обращения: 06.04.2025).
29. Мысленков С.А., Круглова Е.Е., Багатинский В.А. Повторяемость штормового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы.. - 2024. - № 1 (391). - С. 41-55.

30. Навигация в Арктике: Спутниковые стратегии повышения безопасности на море // Universum: технические науки URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16904> (дата обращения: 23.02.2025).
31. Нарижная А.И., Чернокульский А.В., Эзау И.Н. Холодные вторжения над морями Российской Арктики: климатология, тренды, облачно-радиационные характеристики атмосферы // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат арктической зоны. - 2020. - С. 33-35.
32. Нестеров Е.С., Кабак А.М. Руководящий документ "Наставление по морским метеорологическим прогнозам". - М.: Просвещение, 2022. - 8 с.
33. Обзор QGIS // QGIS URL: <https://qgis.org/project/overview/> (дата обращения: 19.12.2024).
34. Особенности и перспективы развития морских портов Арктического бассейна // Молодой учёный URL: <https://moluch.ru/archive/66/10951/> (дата обращения: 31.01.2025).
35. Открытая настольная ГИС SAGA - общая характеристика // Gis-Lab URL: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (дата обращения: 25.03.2025).
36. (Старая версия диплома – 26) Отчет о производственной морской практике по программе «Плавучий университет», ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова // Ассоциация плавучих университетов URL: <https://edufleet.ru/journals/maritime-practice-report-adm-makarov-state-university-2019-2/> (дата обращения: 23.02.2025).
37. Петрова А.Н. Изменение температуры воздуха по данным некоторых станций арктической зоны республики Саха (Якутия) // Арктический вектор: стратегия развития. - 2019. - С. 208-211.
38. Петров Г.И. Особенности ледовой навигации в устьевых областях сибирских рек // Проблемы Арктики. 2019. № 2. С. 89-97.
39. Повышение температуры океана влияет на судоходство // Marine Industry News URL: <https://ru.marineindustrynews.co.uk/ocean-temperature-rise-affects-shipping-industry/> (дата обращения: 23.02.2025).

40. Правительство России утвердило план по развитию Северного морского пути до 2035 года // Интернет портал СНГ URL: <https://e-cis.info/news/567/109196/> (дата обращения: 31.01.2025).

41. Причалам нужна работа // rg.ru URL: <https://rg.ru/2024/11/12/reg-szfo/prichalam-nuzhna-rabota.html> (дата обращения: 31.01.2025).

42. Разлетова А.Б., Никитина В.Н., Ляшко Г.Г., Калинина Н.И., Дубровская Е.Н., Котенко П.К. Гигиеническая оценка особенностей трудовой деятельности экипажа в условиях Арктики и нормативное обеспечение охраны здоровья моряков: перспективное исследование // Морская медицина. - 2022. - №3. - С. 88-99.

43. Раскрыто влияние судоходства на климат // Рамблер/новости URL: <https://news.rambler.ru/tech/49477225-raskryto-vliyanie-sudohodstva-na-klimat/> (дата обращения: 23.02.2025).

44. Родичкин А., Ишмуратова М., Буранбаева Л. и др. Северный морской путь: история, регионы, проекты, флот и топливообеспечение / Под ред. А. Климентьева. М., Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. 2020. Серия «Арктические исследования». Т. 3. 105 с.

45. Сосновский А.В., Осокин Н.И. Высота снежного покрова и её динамика на материковой части российской Арктики в условиях современного климата // Лёд и снег. - 2024. - №2. - С. 238-251.

46. Статья на тему Влияние Климатических условий на состояние здоровья моряков // Study Cat URL: <https://studycat.ru/statya-na-temu-vliyanie-klimaticheskikh-uslovij-na-sostoyanie-zdorovya-moryakov/> (дата обращения: 23.02.2025).

47. Стратегия развития Северного морского пути до 2035 года. М.: Минтранс РФ, 2020. 95 с.

48. Часть I. Метеорологический режим. 5. Условия обледенения судов // Мурманск URL: <https://pogoda51.ru/5-usloviya-obledeneniya-sudov> (дата обращения: 23.02.2025).

49. Чашин А. Н, "Основы обработки спутниковых снимков в QGIS". – Пермь: ИПЦ "ПрокростЪ", 2018. - 48 с.
50. Чмилюк А.Е., Сапегина А.М., Сбитнева Д.А. Строительство зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Фундаментальные и прикладные научные 97 исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации. - 2023. - С. 165-168.
51. Шубенков М.В., Благодетелва О.М. Диксон - Арктический форпост России // АМІТ. - 2012. - №5. - С. 12-24.
52. A Mapping and Gridding Primer // Points, Pixels, Grids, and Cells URL:
https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/short_range/tools/ppgc.html
(дата обращения: 25.03.2025).
53. Chen, Z.; Pasher, J.; Duffe, J.; Behnamian, A. Mapping Arctic Coastal Ecosystems with High Resolution Optical Satellite Imagery Using a Hybrid Classification Approach. // Can. J. Remote Sens. - 2017. - №43. - С. 513-527.
54. GEBCO - The General Bathymetrik Chart of the Oceans URL:
<https://www.gebco.net/> (дата обращения: 25.03.2025).
55. GEBCO Gridded Bathymetry Data Download // GEBCO - The General Bathymetrik Chart of the Oceans URL: <https://download.gebco.net/> (дата обращения: 25.03.2025).
56. Hiroshi Sumata, Laura de Steur , Dmitry V. Divine , Mats A. Granskog & Sebastian Gerland Regime shift in Arctic Ocean sea ice thickness // Article. - 2023. - №615. - С. 443-449.
57. Jones, B. M., Arp, C. D., Whitman, M. S., Nigro, D. A., Nitze, I., Beaver, J. R., Gädeke, A., Zuck, C., Liljedahl, A. K., Daanen, R. P., Torvinen, E., Fritz, S., Grosse, G., & Grosse, G. A lake-centric geospatial database to guide research and inform management decisions in an Arctic watershed in northern Alaska experiencing climate and land-use changes // AMBIO: A Journal of the Human Environment. - 2017. - №46. - С. 769-786.

58. Landy, J.C., Dawson, G.J., Tsamados, M. A year-round satellite sea-ice thickness record from CryoSat-2 // *Nature*. - 2022. - №609. - С. 517-522.
59. Lantuit, H., Overduin, P., Couture, N., Wetterich, S., Are, F.E., Atkinson, D.E., Brown, J., Cherkashov, G., Drozdov, D., Forbes, D.L., et al The Arctic Coastal Dynamics Database: A New Classification Scheme and Statistics on Arctic Permafrost Coastlines // *Estuaries Coasts*. - 2012. - №35. - С. 383-400.
60. Petropoulos, G.P., Petsini, T., Detsikas, S.E. Geoinformation Technology in Support of Arctic Coastal Properties Characterization: State of the Art, Challenges, and Future Outlook // *Land*. - 2024. - №13. - С. 776.
61. Philipp, M., Dietz, A.J., Ullmann, T., Kuenzer, C. Automated Extraction of Annual Erosion Rates for Arctic Permafrost Coasts Using Sentinel-1, Deep Learning, and Change Vector Analysis // *Remote Sens*. - 2022. - №14. - С. 36-56.
62. Ringing in the new year with a warm Arctic // National Snow and Ice Data Center URL: <https://nsidc.org/sea-ice-today/analyses/ringing-new-year-warm-arctic> (дата обращения: 14.01.2025).
63. Smith J., Johansen K. Arctic Ports Infrastructure // *Polar Geography*. 2022. Vol. 45. P. 112-125.
64. System for Automated Geoscientific Analyses URL: <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (дата обращения: 25.03.2025).
65. The Future of Arctic Shipping. London: IMO, 2021. 76 p.