



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

На тему: Особенности формирования геоинформационных систем
для оценки состояния акватории Берингова моря

Исполнитель Серкова Екатерина Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

(подпись)

кандидат технических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Коринец Екатерина Михайловна

(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич

(фамилия, имя, отчество)

« » 2025 г.

Санкт-Петербург

2025



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра информационных технологий и систем безопасности

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой ИТиСБ

_____/ Бурлов В.Г.

«__» _____ 20__ г.

Задание

на выпускную квалификационную работу

Студенту Серковой Екатерине Владимировне

- 1. Тема** «Особенности формирования геоинформационных систем для
оценки состояния акватории Берингова моря»

закреплена приказом ректора Университета от «__» ____ 20__ года, № ____.

- 2. Срок сдачи законченной работы**

- 3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе:**

Научные статьи, проектная документация, учебные пособия.

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке (краткое содержание работы):

- Изучить способы применения ГИС в морях Северного морского пути;
- Изучить акваторию Берингова моря, ее физико-географические особенности;
- Создать модель акватории Берингова моря;
- Оформить ВКР как рукописный труд, разработка презентации и защита ВКР.

5. Перечень материалов, предоставляемые к защите:

- раздаточный материал

6. Консультанты по работе:

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Доцент каф. ИТиСБ, к.т.н, доцент

Коринец Екатерина Михайловна

(должность, ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество)

(подпись)

Дата выдачи задания: «__» _____ 20__ года

Задание принял к исполнению

Студент Серкова Екатерина Владимировна, МД-М23-1

(фамилия, имя, отчество, учебная группа)

(подпись)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация: 88 страниц, 65 рисунков, 3 таблицы, 71 источник литературы.

Объект исследования: акватория Берингова моря.

Предмет исследования: геоинформационные системы (ГИС).

Цель работы: создание геоинформационной модели акватории Берингова моря.

В магистерской диссертации производится анализ способов применения ГИС в морях Северного морского пути, и анализ акватории Берингова моря, ее физико-географических особенностей.

Разработана модель акватории Берингова моря и рекомендации по ее использованию.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС В МОРЯХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ	8
1.1. Навигация	8
1.2. Ледовая обстановка	18
1.3. Картографирование морского дна	27
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АКВАТОРИИ БЕРИНГОВА МОРЯ	31
2.1. Особенности рельефа	31
2.2. Климатические особенности	34
2.3. Сезонная изменчивость течений	55
ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ	67
3.1. Сбор данных	67
3.2. Подготовка данных	69
3.3. Построение модели дна акватории Берингова моря	70
3.4. Практические рекомендации	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	80
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	82

ВВЕДЕНИЕ

Для различной деятельности в северных морях России необходимы инструменты и методы для ее оптимизации, изучения акваторий и обеспечения безопасности этой деятельности, как для человека, так и для окружающей среды. Одним из таких инструментов являются геоинформационные системы. Геоинформационные системы (ГИС) – это системы сбора, хранения и анализа географических данных и связанной с ними информации об объектах.

ГИС позволяют обрабатывать и моделировать пространственные данные. На данный момент, они находят применения во множестве сфер человеческой деятельности, от определения оптимального маршрута, как на суше, так и в море, до различного рода проектирования и научных исследований.

Актуальность создания геоинформационных моделей акваторий заключается в том, что они помогают в изучении и количественной оценке состояния природной среды, моделировании экологических ситуаций, прогнозировании ландшафтных процессов, и задействованы в таких важных отраслях, как: морская навигация, добыча и транспортировка полезных ископаемых, экологическая безопасность, научная деятельность и т.д.

Целью работы является создание геоинформационной модели акватории Берингова моря.

Для достижения поставленной цели при написании работы определены следующие задачи:

1. Изучить способы применения ГИС в морях Северного морского пути.
2. Изучить акваторию Берингова моря, ее физико-географические особенности.
3. Создать модель акватории Берингова моря.

Объект исследования – акватория Берингова моря.

Предмет исследования – геоинформационные системы (ГИС).

При написании работы применялись методы анализа, синтеза, дедукции, индукции, логический и сравнительный.

Теоретической базой исследования являются научные труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные исследованию геоинформационных систем, и их применения в морской среде.

Информационная и эмпирическая база исследования основана на использовании методических пособий по теме исследования, технических регламентов, материалов нормативно-технических документаций.

По структуре работа состоит из введения, трех глав, посвященных теме исследования и отражающих поставленные при написании работы задачи, заключения и списка использованной литературы. В первой главе раскрываются общие сферы и методы применения ГИС в морях Северного морского пути. Во второй главе рассмотрены основные физико-географические особенности Берингова моря, и обоснован выбор данной акватории для создания модели. В третьей главе описывается процесс создания модели дна Берингова моря, представлены результаты и даны рекомендации по использованию разработанной модели, проведен анализ данных и рассмотрены способы ее применения.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС В МОРЯХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

1.1. Навигация

Северный морской путь имеет огромное значение для России. Северный морской путь — самый короткий морской путь между Европейской Россией и Дальним Востоком, который проходит по морям Северного Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское моря) и частично Тихого океана (Берингово море).



Рисунок 1.1 – Маршрут Северного морского пути

Это прежде всего доступ к богатейшим ресурсам Арктического шельфа и месторождениям Сибири. Сегодня в Арктике добывают 10% общемировых объемов нефти и 25% природного газа. При этом на российском севере сосредоточены 80% всей арктической нефти и газа.

По ориентировочным оценкам ученых, общая стоимость разведанных запасов минерального сырья недр Арктической зоны составляет 1,5–2 трлн долларов. А в целом стоимость минерального сырья арктических недр

превышает 30 трлн долларов, причем две трети из них приходятся на стоимость энергетических ресурсов.

Севморпуть объединяет в общую транспортную сеть речные артерии, пролегающие на 70% территории России. Сейчас по трассе СМП перевозят товары первой необходимости для городов арктического побережья. Для многих северных регионов единственной альтернативой морским перевозкам являются дорогие воздушные, поэтому экономика 29 регионов России зависит от развития Северного морского пути [15].

Сейчас Северный морской путь является одним из важнейших направлений развития. План направлений его развития показан в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – План развития Северного морского пути

Направления		
Грузовая база	Грузовой и ледокольный флот	Безопасность судоходства
- Развитие экспортной грузовой базы - Развитие каботажных перевозок - Развитие транзитных перевозок - Развитие перспективной грузовой базы	- Развитие арктического грузового флота - Развитие ледокольного флота - Создание и развитие судостроительных и судоремонтных мощностей	- Создание арктической спутниковой группировки - Гидрографическое обеспечение - Гидрометеорологическое обеспечение - Аварийно-спасательная инфраструктура - Экологическая безопасность судоходства

В связи с важностью, но труднодоступностью СМП, его развитие и эксплуатация требует использования и совершенствования средств навигации, к которым относятся технологии ГИС.

Навигационная безопасность является одной из важнейших составляющих комплексной системы обеспечения безопасности мореплавания, помимо технологической безопасности и системы охранных мероприятий в соответствии

с требованиями Кодекса ОСПС. На навигацию и мореплавание оказывают влияние стихийные гидрометеорологические явления. К влияющим параметрам относятся: скорость ветра, уровень воды в порту, видимость, волнение, ледовые условия, и т.д.

Для обеспечения навигационной безопасности мореплавания выполняются мероприятия по созданию подсистем:

- установленных путей движения судов (УПДС);
- управления движением судов (СУДС);
- мониторинга и автоматического сопровождения судов;
- автоматической информационной системы (АИС);
- средств навигационного оборудования (СНО);
- морской радиосвязи, судовых сообщений и обеспечения информацией;
- правил плавания и других нормативно-правовых актов, регулирующих

мореплавание.

Более расширено, эти мероприятия обычно включают:

- создание и модификацию систем управления движением судов (СУДС), обеспечивающих плавание судов на подходах к портам и в узкостях, на основе радиолокационного контроля местоположения судов на фарватерах, АИС, и предоставление судам необходимой навигационной информации в случаях возникновения затруднений и при нарушениях режима движения;

- обеспечение работы морских районов Глобальной морской системы связи при бедствиях (ГМССБ);

- установление правил плавания на акваториях портов;

- организация лоцманского, буксирного и ледокольного обеспечения движения судов;

- создание, развитие и поддержание в рабочем состоянии системы средств навигационного оборудования – плавучих, береговых, светящихся, радиотехнических и пр., для обеспечения возможности высокоточного определения координат судов и ограждения навигационных опасностей;

- рациональное распределение судопотоков путем создания системы установленных путей движения судов (УПДС), включающие схемы разделения движения, зоны прибрежного плавания, глубоководные пути, специально предназначенные для судов с опасными грузами, места якорных стоянок и др.;

- обеспечение необходимых габаритов элементов, составляющих акваторию порта: разворотных мест, операционных акваторий причалов, ковшей и бассейнов; возможность непрерывного высокоточного местоопределения судов, гарантирующую их нахождение в отведенных полосах движения при любых условиях видимости;

- информационное обеспечение судов навигационной и гидрометеорологической информацией по региону;

- контроль за положениями судов и соблюдением ими режима плавания, оказание помощи при затруднениях в определении места, а также в аварийных ситуациях;

- высокую эффективность операций при поиске и спасании, а также при ликвидации последствий аварий;

- надежную радиосвязь между всеми участниками движения и береговыми лоцманами-операторами, контролирующими движение в обслуживаемой зоне, а также с Морским спасательно-координационным центром (МСКЦ);

- введение нормативных актов (Правил плавания), определяющих обязанности участников движения с учетом маневренных возможностей судов, характера перевозимого груза, т.д. и систем управления этим движением.

В соответствии с положениями Конвенции СОЛАС в России созданы региональные системы обеспечения безопасности мореплавания по различным бассейнам, внедрены сети контрольно-корректирующих станций ГЛОНАСС\GPS, системы ГМССБ (глобальной морской системы связи при бедствии для обеспечения безопасности), АИС (автоматической идентификационной системы) [2].

На данный момент в эксплуатации находятся несколько глобальных спутниковых навигационных систем, каждая из которых имеет свой

собственный набор спутников и операционную инфраструктуру. К наиболее крупным навигационным системам относятся: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou.

Глобальная система позиционирования (GPS) – является наиболее широко используемой и известной спутниковой навигационной системой в мире. Она состоит из 31 спутника, которые вращаются вокруг Земли, обеспечивая глобальное покрытие 24 часа в сутки. GPS изначально была разработана для военных целей, но стала доступна для гражданского использования. В основном GPS используется для навигации в автомобилях, услуг на основе определения местоположения, но она также может использоваться и в мореплавании.

Причины востребованности GPS в морской навигации:

1) Точность позиционирования. Системы GPS предоставляют точные данные о местоположении, что имеет важное значение для навигации в океане. С помощью спутников устройства GPS определяют местоположение судна с точностью до нескольких метров. Это чрезвычайно важно для безопасности, особенно в опасных водах и на оживленных судоходных путях. Автоматические системы идентификации (AIS) с поддержкой GPS позволяют передавать информацию о местоположении, курсе судна и другие данные на ближайшие суда и в центры мониторинга движения, что снижает риск столкновений.

2) Скорость реагирования при чрезвычайных ситуациях. GPS повышает безопасность мореплавания, так как в случае бедствия – возможна быстрая передача координат в службы спасения, что ускоряет скорость реагирования.

3) Рациональное планирование маршрута. С помощью GPS становится возможным более эффективное планирование маршрута, что позитивно сказывается на скорости, безопасности и экономических показателях.

4) Интеграция с другими навигационными системами. Системы GPS часто интегрируются с другими навигационными средствами, такими как радар, сонар и электронные карты. Такая интеграция позволяет обновлять и корректировать курс в режиме реального времени, повышая общую ситуационную осведомленность экипажа.

5) Мировая торговля. Система GPS упростила международное судоходство, основу мировой торговли. Обеспечивая своевременную и безопасную доставку товаров морскими путями, что делает технологию GPS важным инструментом в поддержании мировой экономики.

6) Проблемы и перспективы. К проблемам использования GPS в морских условиях можно отнести помехи и потенциальные кибер-атаки. Однако, технологии совершенствуются, разрабатываются все более надежные и безопасные системы. Это способствует усовершенствованию GPS в будущем.

В сфере морской навигации системы GPS стали незаменимыми инструментами, обеспечивающими точность, безопасность и эффективность мореплавания [16].



Рисунок 1.2 – Спутники ГЛОНАСС и GPS

ГЛОНАСС. «Глобальная навигационная спутниковая система» (ГЛОНАСС) является российским аналогом GPS. Она состоит из 24 спутников, и предоставляет услуги глобального позиционирования. ГЛОНАСС широко используется в России и соседних странах. Эта совместима с GPS и другими системами, что расширяет возможности ее использования. ГЛОНАСС обеспечивает полное глобальное покрытие и используется в самых разных

сферах, от авиации до поисково-спасательных операций. Далее перечислены способы применения ГЛОНАСС в морском деле:

1) Управление движением судов. Внедрение ГЛОНАСС позволяет диспетчерам отслеживать движение в реальном времени, оптимизировать маршруты и графики, а также своевременно реагировать на изменения в обстановке. Система обеспечивает более эффективное использование портовой инфраструктуры и снижает риск столкновений и аварий.

2) Мониторинг состояния морских путей. С помощью специальных датчиков и оборудования, установленных на судах, можно отслеживать глубину, температуру воды, течения и другие параметры, чтобы своевременно выявлять опасные участки и проводить необходимые работы по минимизации рисков.

3) Контроль грузоперевозок. ГЛОНАСС отслеживает местоположение и состояние контейнеров, контролирует время доставки и обеспечивает безопасность грузов. Это особенно важно для перевозки опасных грузов.

ГЛОНАСС обеспечивает:

1) Точное позиционирование. Одним из главных преимуществ ГЛОНАСС в морском транспорте является точное определение местоположения судов в режиме реального времени. Точное позиционирование способствует предотвращению столкновений и других аварийных ситуаций, а также позволяет более эффективно управлять движением кораблей в портах и на морских маршрутах.

2) Оптимизация маршрутов и логистики. ГЛОНАСС значительно упрощает логистику. Точные данные о местоположении и скорости используются для оптимизации маршрутов, это сокращает время и затраты на перевозку грузов. Это существенно для судоходных компаний, которые стремятся минимизировать эксплуатационные расходы и увеличить эффективность своих операций.

3) Безопасность. ГЛОНАСС позволяет отслеживать движение в море, своевременно выявляя потенциальные угрозы. Путем отслеживания судов

система контролирует соблюдение правил морской навигации. Это помогает предотвращать незаконные действия, включая пиратство и контрабанду.

4) Управление флотом и техническое обслуживание. ГЛОНАСС отслеживает состояние и технические параметры судов, что способствует своевременному проведению технического обслуживания и предотвращению поломок. Это снижает эксплуатационные расходы и увеличивает надежность флота. Кроме того, информация используется для мониторинга работы экипажа и оптимизации расходования ресурсов.

5) Совместимость с другими системами. Интеграция с автоматической идентификацией судов (AIS), метеорологическими системами и системами управления движением судов (VTS) повышают эффективность перевозок по морю [17].

Таблица 1.2 – Основные параметры ГЛОНАСС и GPS

Характеристики	ГЛОНАСС	GPS
Число космических аппаратов	24	24
Количество орбитальных плоскостей	3	6
Количество спутников на орбите	8	4
Погрешность позиционирования, м	2-6	2-4
Покрытие	Вся РФ и 2/3 территории планеты	Около 100% мировой территории
Продолжительность активного существования, лет	7	7,5

Европейская система Galileo предназначена для предоставления высокоточных спутниковых навигационных услуг по всему миру. Она стремится стать независимой системой, предлагающей более точную и надежную информацию о местоположении по сравнению с существующими глобальными системами, такими как GPS. Ожидается, что она будет состоять из 30 спутников. Система разработана с высоким уровнем безопасности, что делает ее пригодной

как для гражданских сфер, так и для критически важной инфраструктуры и оборонных целей.

BeiDou — это спутниковая навигационная система Китая, которая обеспечивает глобальное покрытие. Система является частью плана Китая по обеспечению собственной независимой навигационной инфраструктуры. Система быстро расширяется, с 2020 года она начала предлагать глобальное покрытие пользователям по всему миру [18].

Также стоит упомянуть такие спутниковые системы как Automatic Identification System/Автоматическая идентификационная система (AIS), и Synthetic Aperture Radar (SAR), которые играют важную роль в современном отслеживании судов, и приносят пользу таким отраслям, как судоходство и рыболовство.

AIS - позволяет осуществлять наблюдение в реальном времени и идентифицировать суда, включая рыболовные и грузовые, даже в отдаленных районах океана за пределами доступа прибрежных сетей наблюдения.

SAR - отслеживает поверхность Земли с помощью изображений со спутников независимо от погоды или условий освещения. Принцип работы заключается в том, что испускаются электромагнитные волны и анализируются отраженные сигналы, предоставляя подробную информацию о таких элементах поверхности, как суда, морской лед или разливы нефти. Эта технология имеет решающее значение для наблюдения, поскольку она позволяет осуществлять непрерывный мониторинг изменений окружающей среды. Эта возможность жизненно важна для наблюдения за судами и обнаружения нарушений, таких как незаконное рыболовство. Это способствует морской безопасности и охране окружающей среды.

Процесс сбора данных со спутников включает передачу информации с орбиты. Они собирают такие данные, как идентификационный номер судна, его положение, скорость и маршрут. Процесс упрощается за счет получения изображений поверхности Земли с высоким разрешением даже в плохую погоду или в темноте. После сбора данные обрабатываются и анализируются,

предоставляя точные и немедленные сведения о местоположении. Это позволяет властям контролировать суда по всему миру, оптимизировать маршруты навигации и обнаруживать чрезвычайные ситуации.

Спутники также способны предоставлять точные метеорологические и океанографические данные, включая скорость ветра, высоту волн и океанические течения. Эта информация позволяет судам избегать неблагоприятных метеорологических условий, минимизируя расход топлива и повышая безопасность [19].

Если говорить именно о Северном морском пути, то, за последние несколько лет, одной из главных задач на пути его преобразования из непредсказуемой дороги в международный транспортный коридор, является создание ледового навигатора. Согласно современным нормам судоходства, геолокация корабля всегда должна быть видна портам и экстренным службам, судну предписано идти строго по намеченному коридору и находиться в плотной связи с диспетчерскими пунктами на берегу и спутниками в космосе. Для Арктики данная система сейчас работает, но не везде и не всегда. Огромные расстояния между портами, сложная ледовая обстановка, капризная и местами даже опасная погода Заполярья постоянно вносят коррективы в график движения судов, что не может не отразиться на объеме перевозимых грузов. Чтобы решить задачу по безопасной и предсказуемой навигации по СМП, Россия решила создать масштабную систему контроля движения судов, которая получила название «ледовый навигатор».

Среди преимуществ проекта выделены независимость съемки от метеоусловий и времени суток, возможность построения детальных цифровых моделей местности, наблюдение малоразмерных объектов при значительной полосе обзора и так далее [20].

Создание цифровой экосистемы включает установку бортовых автоматизированных информационно-измерительных комплексов на судах в акватории СМП, а также самолётах и вертолётах ледовой разведки. Предполагается, что благодаря данным таких комплексов удастся повысить

точность оценки метеорологической и навигационной обстановки. Затем сформированный массив информации о погодных условиях, расположении судов и ледоколов, загруженности портов попадёт на Единую платформу цифровых сервисов СМП, где с ним смогут работать зарегистрированные пользователи – грузоперевозчики, судовладельцы, капитаны судов и страховщики. Создание цифровой экосистемы идёт в рамках федерального проекта «Развитие Северного морского пути».

На базе созданной информационной платформы будут оказываться логистические услуги судоходным компаниям, использующим Северный морской путь. Речь идёт в том числе об оформлении разрешений на проход судов, мониторинге, диспетчеризации, управлении работой флота. [21]

1.2. Ледовая обстановка

Для обеспечения безопасности мореплавания, особенно в морях СЛО, необходимо следить за ледовой обстановкой. К мониторингу льда относятся такие факторы, как: толщина льда, его прочность, области распространения и прочие факторы, которые могут повлиять на безопасность и возможность судоходства и работы на морских объектах.

Факторы, из-за которых необходимо наблюдение за льдом:

1) Безопасность навигации. Актуальная информация о ледовой обстановке, о толщине и прочности льда, позволяет мореплавателям выбрать оптимальный и наиболее безопасный маршрут;

2) Планирование и экономика. Морской лед влияет на многие сферы человеческой деятельности: судоходство, рыболовство, добыча ресурсов и т.д. Мониторинг льда позволяет разрабатывать стратегии для минимизации экономических потерь;

3) Экология. Состояние и распространение морского льда являются важными показателями изменений климата, и морской экосистемы [22].

На данный момент, существуют следующие инструменты для изучения морского льда:

- 1) Радиолокаторы, в том числе с синтезированной апертурой (РСА):
 - Sentinel-1 A, B;
 - RadarSat-2;
- 2) Микроволновые радиометры:
 - AMSR2;
 - SSMI, SSMIS;
 - WindSat;
 - SMOS;
 - SMAP;
- 3) Альтиметры:
 - CryoSat-2;
 - Saral;
 - Sentinel-3;
 - IceSat-2;
 - Jason-2, Jason-3;
 - HY-2;
- 4) Скаттерометры:
 - ASCAT;
 - SCAT;
 - OSCAT;
- 5) Многоспектральные сканирующие комплексы (ИК, видимый):
 - MODIS;
 - VIIRS;
 - AVHRR;
 - Sentinel-2 [23].

Преимущества использования радарных данных ДЗЗ:

- 1) Широкий охват и глобальное покрытие ледовых областей.
- 2) Спутники с радарными сенсорами позволяют наблюдать за обширными районами льда.
- 3) Работа в любых погодных условиях и времени суток.
- 4) Радарные сенсоры работают независимо от облачности или освещения, позволяя собирать данные в течение дня и ночи.
- 5) Высокое пространственное разрешение и детальная информация.
- 6) Радарные сенсоры обеспечивают детальные снимки с высоким разрешением, позволяя изучать свойства и динамику ледовых образований.
- 7) Слежение за изменениями и динамикой ледовых масс.
- 8) Непрерывный мониторинг с помощью радарных сенсоров позволяет отслеживать изменения в ледовых областях и анализировать их динамику.
- 9) Открытие новых научных данных.
- 10) Данные, собранные с помощью радарных сенсоров, предоставляют новые научные познания о ледовых образованиях и их взаимодействии с окружающей средой [22].

Помимо перечисленного, существуют такие технологии для мониторинга льда как LiDAR. Технология LiDAR (Light Detection and Ranging) — это мощный инструмент для мониторинга ледовых условий в Арктике. LiDAR использует лазерные импульсы для измерения расстояний и создания карт поверхности Земли с высоким разрешением. При установке на дроны, система LiDAR может измерять толщину льда, отслеживать его разрушение и предоставлять точные данные о морском льде. Это позволяет охватывать большие территории и собирать подробную информацию, необходимую для изучения Арктики.

Применение системы «LiDAR»:

- 1) Толщина льда;
- 2) Распад льда. «LiDAR» может обнаруживать изменения высоты поверхности льда. Это позволяет прогнозировать распад и таяние льда;

3) Картографирование. LiDAR может создавать подробные карты ледяных объектов, таких как хребты, трещины и расщелины. Эти карты помогают исследователям понять структурную целостность ледяных щитов и выявить потенциальные опасности.

Программа Landsat состоит из серии спутниковых миссий по наблюдению за Землей, совместно управляемых NASA и Геологической службой США (USGS). На сегодняшний день было проведено девять миссий, восемь из которых были реализованы [24].

ICESat (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite/Спутник для наблюдения за льдом, облаками и высотой суши). ICESat — это миссия NASA/GSFC в рамках программы ESE (Earth Science Enterprise). Основная цель — мониторинг баланса массы полярных ледяных щитов и их вклада в глобальное изменение уровня моря. Вторичные цели — измерение высоты облаков и вертикальной структуры облаков и аэрозолей в атмосфере, а также измерение шероховатости, отражательной способности, высоты растительности, снежного покрова и характеристик поверхности морского льда, а также картирование топографии поверхности суши [25].

Оперативным мониторингом морского льда на акватории СЛО в настоящее время занимаются ледовые службы пяти приарктических государств: России, Канады, США, Дании и Норвегии. Наблюдения за ледовой обстановкой ведутся круглый год, и на их основе составляются ледовые прогнозы различной заблаговременности. Информация, предоставляемая ледовыми службами, различается по своему составу и районам. Так, Датский метеорологический институт (DMI – Danish Meteorological Institute) ведёт мониторинг вод вокруг Гренландии, и на ледовые карты наносятся границы зон одинаковой сплочённости, возрастного состава дрейфующего льда, границы припая, а также наличие льда материкового происхождения (айсберги). Норвежский метеорологический институт (MET.NO – Norwegian Meteorological Institute) отслеживает ледовую обстановку на европейской части СЛО. На ледовых картах отображается только общая сплочённость дрейфующего льда и границы припая.

Канадская ледовая служба (CIS – Canadian Ice Service) выпускает ледовые карты своих территориальных вод, расположенных вдоль арктического и северо-восточного побережий Северной Америки, а также в проливах Канадского Арктического архипелага. Карты содержат информацию о сплочённости, возрастном составе дрейфующего льда, а также положении границ припая. Национальный ледовый центр США (NIC – National Ice Center) производит мониторинг всего Северного Ледовитого океана вместе с прилегающими замерзающими акваториями Тихого океана и Северной Атлантики. Региональные ледовые карты вод, омывающих полуостров Аляска, составляются Национальной службой погоды США (NWS – National Weather Service). На картах NIC и NWS указывается сплочённость и возраст льда.

Центром «Север» Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) выпускаются ледовые карты морей европейской и амеразийской частей Арктики с указанием общей сплочённости льда в летние месяцы (с июня по сентябрь) и возрастного состава в зимние месяцы (с октября по май). Кроме того, производится картирование ледяного покрова замерзающих морей Тихого океана, а также внутренних морей, граничащих с территорией России.

Внедрение ГИС-технологий позволило перейти к выполнению всех этапов создания карт в интерактивном режиме.

Важным источником информации о состоянии ледяного покрова являются наблюдения, выполняемые на сети морских гидрометеорологических станций Росгидромета и передаваемые местными управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) в Мировую базу данных. Комплекс метеорологических и ледовых наблюдений включает в себя температуру воздуха и воды, дальность видимости в сторону моря, сплочённость и тип дрейфующего льда, ширину и толщину припая, высоту снега. Данные о толщине припая используются ледовыми экспертами в качестве реперных: на спутниковых изображениях тон льда в удаленных от берега районах сопоставляется с тоном припая, толщина которого известна. Также, отслеживая фактическое изменение

толщины льда на станции, можно судить о скорости нарастания льда в удалённых районах. На Рисунке 6 показана карта распределения действующих на момент 2019 года морских береговых станций, данные которых используются для анализа.

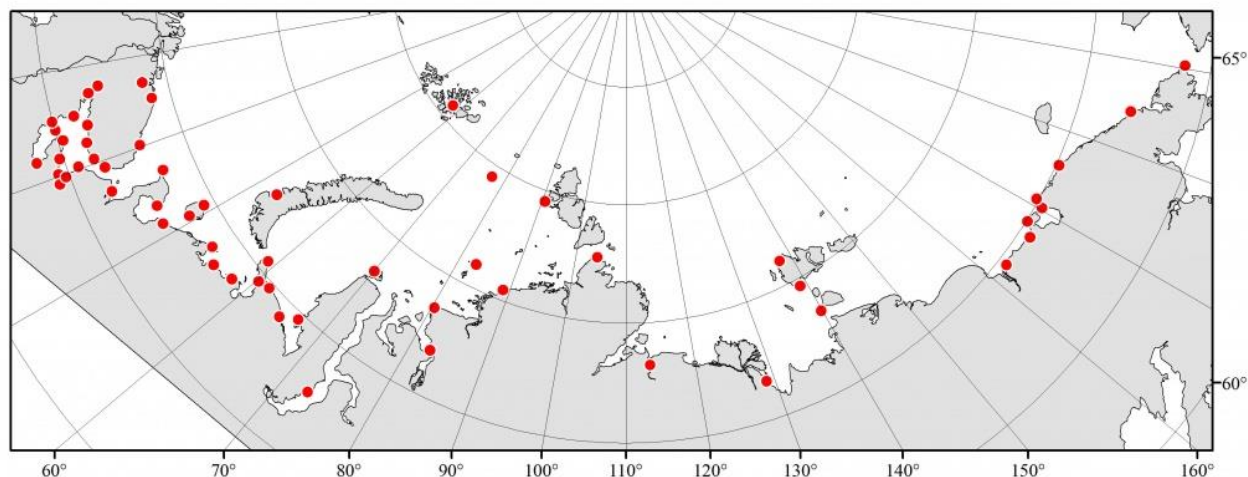


Рисунок 1.3 – Распределение сети морских береговых станций Росгидромета, расположенных в Арктике по состоянию на 2019 г.

В связи с невозможностью проведения регулярных гидрометеорологических измерений в удалённых от берега районах, для оценки скорости нарастания льда в морских частях используются данные глобальной модели Global Forecast System (GFS), а также данные реанализа Национального центра прогнозов окружающей среды (NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (NCAR) США из открытых источников. Экспертом оценивается общий температурный фон исследуемого района и приблизительная скорость нарастания льда.

Часть судов ледового класса, работающих в Российских территориальных водах, ежедневно высылают диспетчерские сообщения на адрес Центра «Север» ААНИИ. Помимо общепринятой навигационной информации (название судна, координаты, дата и др.), судоводители включают в диспетчерские сообщения, наблюдаемые ими ледовые и метеорологические условия на момент составления сообщения. В то же время с судов, на которых проходят научно-

исследовательские экспедиции, организованные с участием сотрудников ААНИИ, поступает детализированная оперативная информация о ледовых и гидрометеорологических условиях плавания. Такие данные представляют ценный источник информации о текущем состоянии ледяного покрова и используются ледовым экспертом для валидации ледовых карт.

Принципы регионального картирования и распределение работы ледовых экспертов. ААНИИ еженедельно выпускает ледовые карты следующих морей СЛО: Гренландского, Баренцева (включая Белое), Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, и Бофорта (включая море Линкольна). Также еженедельно составляются карты Берингова, Охотского (включая Татарский пролив Японского моря), Балтийского, Каспийского и Азовского морей. Границы арктических морей продлены до полюса таким образом, что весь СЛО оказывается поделённым на секторы, и общая карта покрывает не только акваторию моря в пределах его географических границ, но и соответствующий морю район центральной Арктики. Мониторинг каждого моря ведёт один или два ледовых эксперта, имеющих базовые знания о гидрологическом и метеорологическом режиме района, и, предпочтительно (но не во всех случаях), опыт полевых работ в данном районе.

Ледовые карты ААНИИ широко используются для различных научных и практических задач, однако опыт общения с пользователями показывает, что данная информация требует некоторых разъяснений. Само понятие «обзорная ледовая карта» подразумевает некое обобщение, генерализацию. Ледяной покров – очень подвижная среда, и величина суточного дрейфа может достигать 20 морских миль и более. Обзорная ледовая карта отражает лишь некое осреднённое, как правило, за 2-3 суток состояние ледяного покрова и, как уже указывалось ранее, состоит из отдельных частей, привязанных к разным датам. Поэтому при сравнении обзорных ледовых карт ААНИИ с результатами других методов и алгоритмов, основанных на интерпретации одного изображения, необходимо иметь в виду, что границы зон могли быть проведены по более раннему или позднему снимку. По этой же причине, при использовании

обзорных ледовых карт для судоходства, следует учитывать временной интервал, за который составлена карта. При непосредственном движении судна во льдах, после предварительной оценки ледовых условий в районе плавания по обзорной ледовой карте рекомендуется для уточнения использовать самые свежие спутниковые снимки, анализировать прогностическую метеорологическую и ледовую информацию, а также использовать срочные детализированные ледовые карты, отличающиеся более подробным описанием ледовой обстановки в конкретном районе в конкретный момент времени. Срочные детализированные карты составляются экспертами ААНИИ по одному спутниковому изображению, либо по нескольким изображениям, полученным в пределах 3-часового промежутка времени. Обзорные же ледовые карты рекомендуется использовать для предварительного планирования морских операций и общей оценки ледовой обстановки в районе движения судна. Также необходимо отметить, что цветовые обозначения на картах зимнего периода указывают только на тот тип льда, который преобладает в пределах выделенной зоны. Важная информация о количестве разводий, покрытых молодым льдом и ниласом, содержится в символе, который соответствует выделенной однородной зоне [26].

На рисунках 1.4-1.9 представлены некоторые генерализированные ледовые карты СЛО за 2023-2024 года.

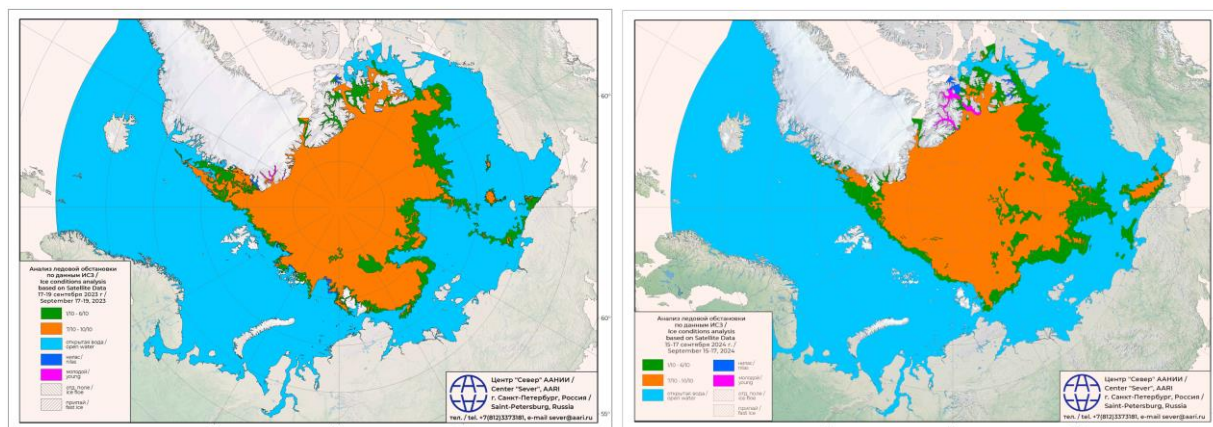


Рисунок 1.4-1.5 – Обзорная ледовая карта СЛО 19 сентября 2023, 17 сентября 2024

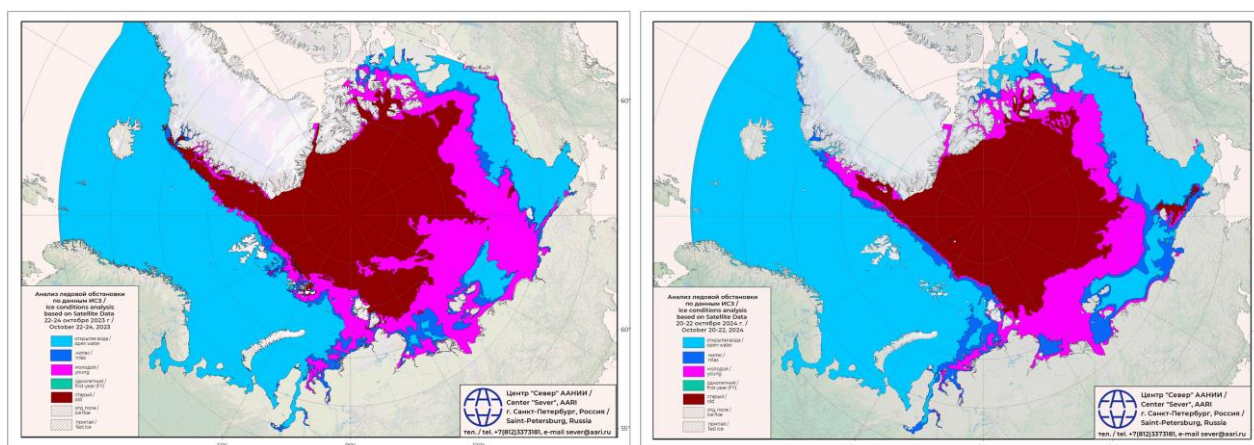


Рисунок 1.6-1.7 – Обзорная ледовая карта СЛО 24 октября 2023, 22 октября 2024

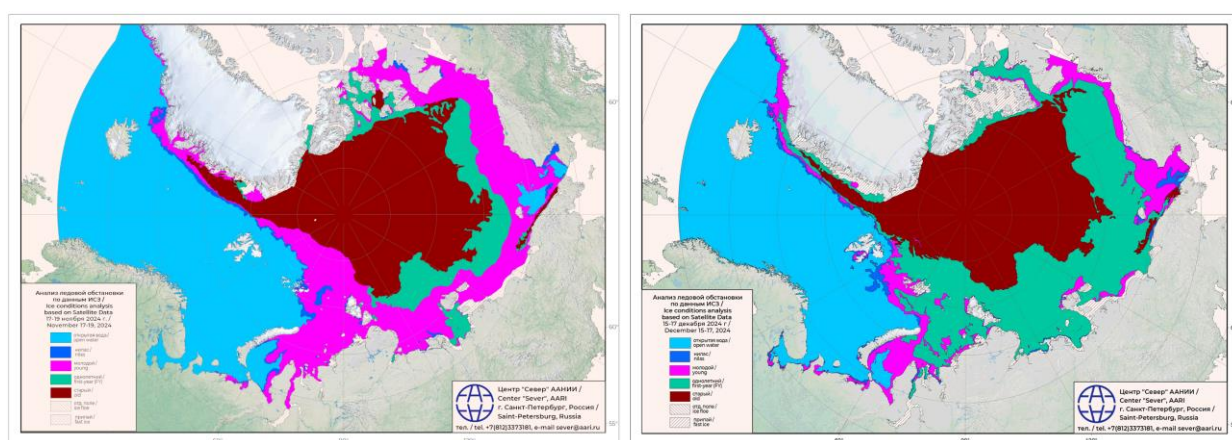


Рисунок 1.8-1.9 – Обзорная ледовая карта СЛО 19 ноября 2024, 17 декабря 2024 [27]

Все исследователи приходят к общему мнению, что полностью автоматизировать процесс дешифрирования морского льда невозможно. У каждого метода всегда есть ряд условий, ограничивающих его применимость. Однако в настоящее время ледовые службы мира активно внедряют автоматические методы в свою работу с целью предварительного анализа спутниковой информации, которой в наши дни становится всё больше. Кроме того, каждый алгоритм разрабатывается под конкретные условия, чаще всего связанные с сезоном или географическим положением района, и грамотное применение алгоритма, безусловно, даёт ледовым аналитикам дополнительную полезную информацию, которая учитывается при составлении карт. На сегодняшний день анализ спутниковых данных в ААНИИ полностью проводится

на интерактивной основе с применением ГИС; однако в будущем планируется внедрение автоматических технологий, которые станут хорошим инструментом, помогающим ускорить процесс обработки большого количества данных и снизить степень субъективности анализа [26].

1.3. Картографирование морского дна

Картографирование морского дна с высоким разрешением является важнейшим инструментом для регулирования разведки, добычи и оборудования подводных ресурсов, позволяя принимать продуктивные и безопасные решения. Карты морского дна также гарантируют, что суда смогут безопасно маневрировать вокруг естественных и созданных человеком структур на дне океана. И эти карты предоставляют информацию, жизненно важную для защиты и отслеживания морской жизни, позволяя характеризовать морские среды обитания и принимать решения для надежных, устойчивых мер по их сохранению.

Технология сонара была разработана в 1920-х годах и значительно улучшила картографирование морского дна. Системы сонара издают звук, а затем регистрируют время, необходимое для получения эха от морского дна. Глубина морского дна рассчитывается с использованием разницы во времени между моментом возникновения звука и моментом, когда слышно эхо.

Ранние однолучевые гидролокационные системы, называемые эхолотами, использовались для измерения глубины морского дна под судном. В 1960-х годах были разработаны многолучевые гидролокационные системы для измерения большей площади с использованием множества звуковых лучей в форме веера. Многолучевой гидролокатор может картировать гораздо более обширные области, чем однолучевой гидролокатор.

Sonar означает Sound Navigation and Ranging (звуковая навигация и определение дальности). Существует два основных типа сонаров: активный сонар и пассивный сонар. Активные гидролокационные системы излучают

звуковой импульс в воду, который затем отражается от морского дна, создавая «эхо». Глубину морского дна можно рассчитать, используя разницу во времени между созданием звука и получением его эха. Пассивные гидролокационные системы – бесшумны. Они поглощают шум, создаваемый кораблями, подводными лодками и морскими животными.

Существует заблуждение, что мы знаем все об окружающем мире. Все цифровые карты стали возможными благодаря географическим информационным системам (ГИС). Цифровые карты – точнее, проще в обращении и вмещают больше информации. Так как ГИС позволяют анализировать и работать с пространственными данными, они востребованы во многих профессиях: городское планирование, ликвидация последствий стихийных бедствий, океанология и т.д.

Современное картирование морского дна часто проводится с помощью гидролокационных систем на морских судах. Эти системы выдают данные высокого разрешения, чем больше точек данных – тем точнее изображение. Многолучевые батиметрические карты служат для многих целей, включая безопасную навигацию и изучение бентоса. Бентос – совокупность организмов, обитающих в или на грунте на дне водоемов. Из-за высокой стоимости и труднодоступности подобного картирования, на момент 2022 года, только 23% морского дна были сняты с высоким разрешением.

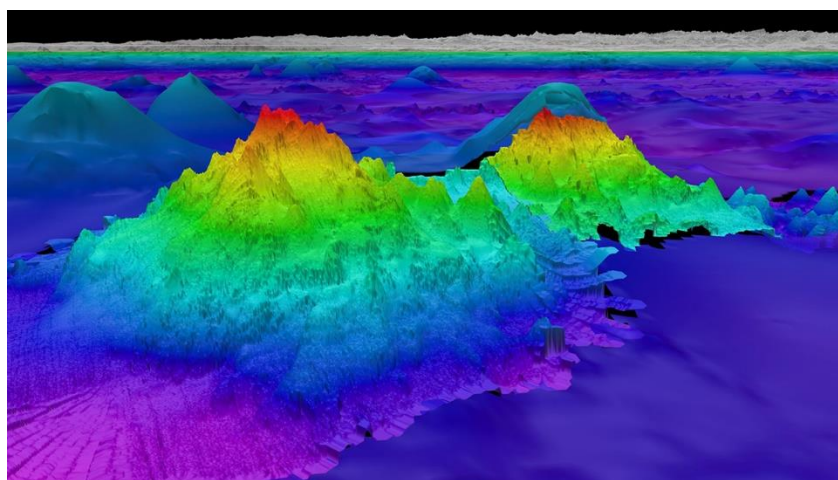


Рисунок 1.10 – ЦМР подводных гор

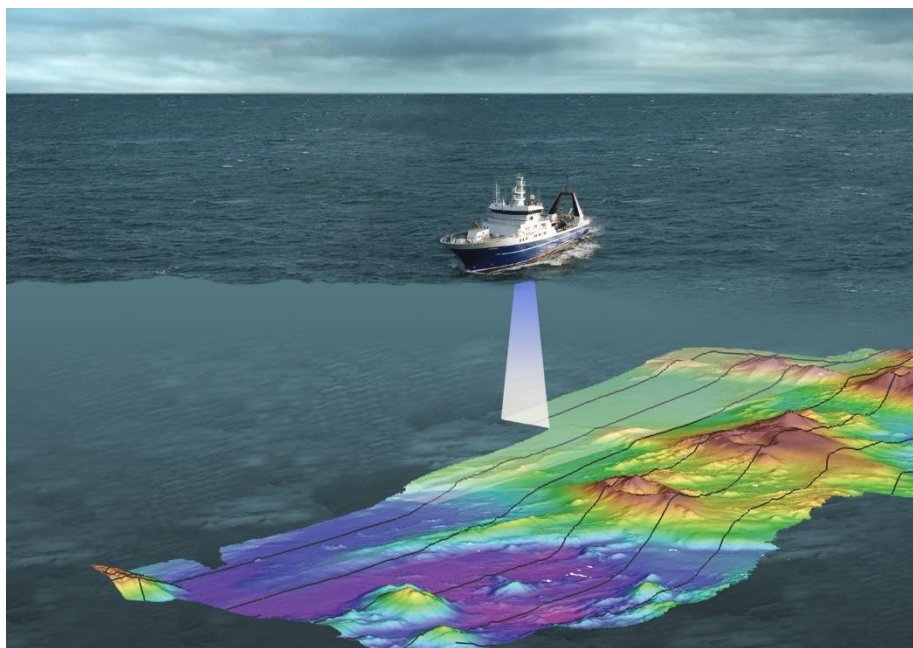


Рисунок 1.11 – Сонар. NIWA LTD 2005 [28]

Хоть, в идеале, предпочтительнее было бы иметь высокоточные изображения всего мирового океана, на данный момент, это невозможно. Современные батиметрические карты состоят из комбинации изображений низкой и высокой точности. Данные с низким разрешением не являются бесполезными, они тоже помогают определять основные очертания морского дна. Большая часть данных изображений низкого разрешения получаются со спутников. Крупные подводные объекты, такие как подводные горы размером более 1,5 км, имеют достаточную массу, чтобы влиять на силу гравитации в данной области. Это создает неровности на поверхности моря. Спутниковые альтиметры достаточно чувствительны, чтобы обнаруживать и измерять эти изменения.

Эти измерения используются для оценки общей формы морского дна. Подобную карту с низким разрешением можно увидеть на карте рельефа Земли Google, или виде со спутника. Она позволяет увидеть глобальное морское дно, но, если посмотреть поближе, можно обнаружить, что многие детали размыты.

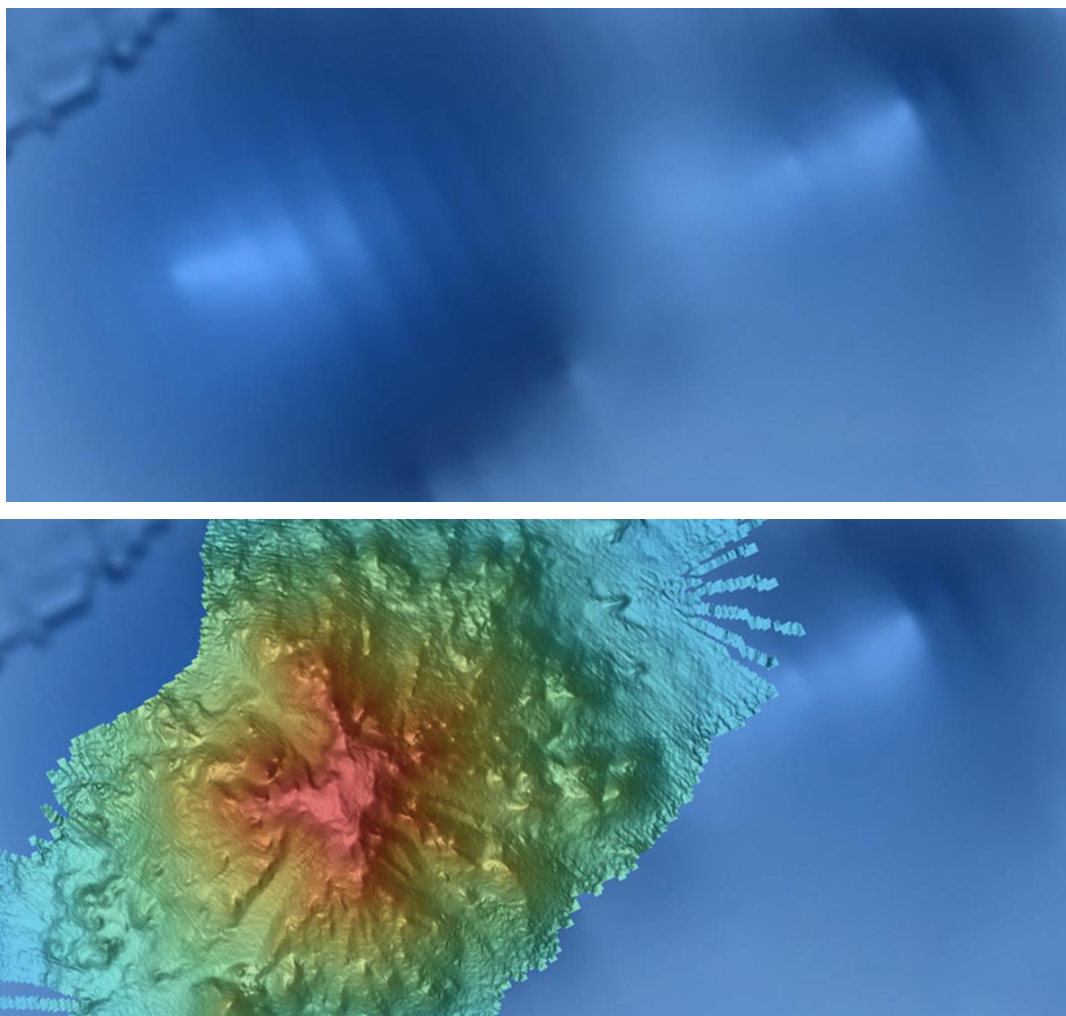


Рисунок 1.12-1.13 – Сравнение данных батиметрии, полученных со спутника, с данными батиметрии высокого разрешения

Данные высокого разрешения содержат больше точек данных и дают больше информации о том, как сформировано морское дно [29].

Таким образом, ГИС широко применяются в сферах, связанных с мировым океаном, в том числе в морях Северного морского пути. ГИС применяются в навигации, в мониторинге льда и картографировании морского дна. А картографирование дна, в свою очередь играет важную роль в навигации, добыче полезных ископаемых, охране природной среды и научных исследованиях.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АКВАТОРИИ БЕРИНГОВА МОРЯ

2.1. Особенности рельефа

Берингово море находится в северной части Тихого океана между континентами Азии и Северной Америки на западе и востоке - и дугой Алеутских и Командорских островов на юге. На севере оно соединено с Северным Ледовитым океаном через Берингов пролив, а на юге – с Тихим океаном через многочисленные проливы Командоро-Алеутской островной гряды. Берингово море является полузамкнутым окраинным морем смешанного материково-океанического типа. Среднее значение глубины моря составляет 1640 м, максимальная глубина находится в Камчатском проливе и равна 4420 метрам. Длина береговой линии – около 13340 км [2].

Море окружают многочисленные бухты и заливы, что вызвано скалистостью и изрезанностью берегов. К наиболее крупным заливам можно отнести Анадырский и Олюторский, которые расположены на западе, Бристольский и Нортон, расположенные на востоке. В Берингово море впадает большое количество рек, наиболее крупные – Анадырь, Апука, Юкон, Кукоквим. Берингово море обладает островами материкового происхождения. К наиболее крупным относятся: остров Святого Лаврентия, Карагинский, Нунивак, Прибылова и остров Святого Матвея [30].

В рельефе дна Берингова моря четко выделяются контрастные морфологические зоны, такие как шельф, островные отмели, материковый склон и глубоководная котловина. Рельеф каждой зоны имеет свои характерные черты. Шельфовая зона с глубинами до 200 м в основном расположена в северной и восточной частях моря, занимая более 40% его площади. Дно этого района представлено обширной пологой подводной равниной шириной около 600—1000 км. В пределах этой равнины находится несколько островов, ложбин и не очень крупных повышений дна.

Глубоководная зона достигает от 3000 до 4000 километров, что создает сильный контраст в сравнении с предыдущей зоной. Глубоководная часть расположена в юго-западной и центральной частях моря и окружена полосой прибрежных отмелей. Ее площадь превышает 40% общей площади и обладает спокойным рельефом. Изолированные впадины практически полностью отсутствуют. Имеющиеся впадины не сильно отличаются от общей глубины ложа, изоляция депрессий выражена слабо. Здесь отсутствуют хребты, которые бы перегораживали море от одного берега до другого. Подводные хребты Ширшова и Бауэрс к таким не относятся, и они не являются препятствием для водообмена. Наибольшие глубины находятся в Камчатском проливе рядом с Алеутскими островами, но занимают незначительную площадь [1].

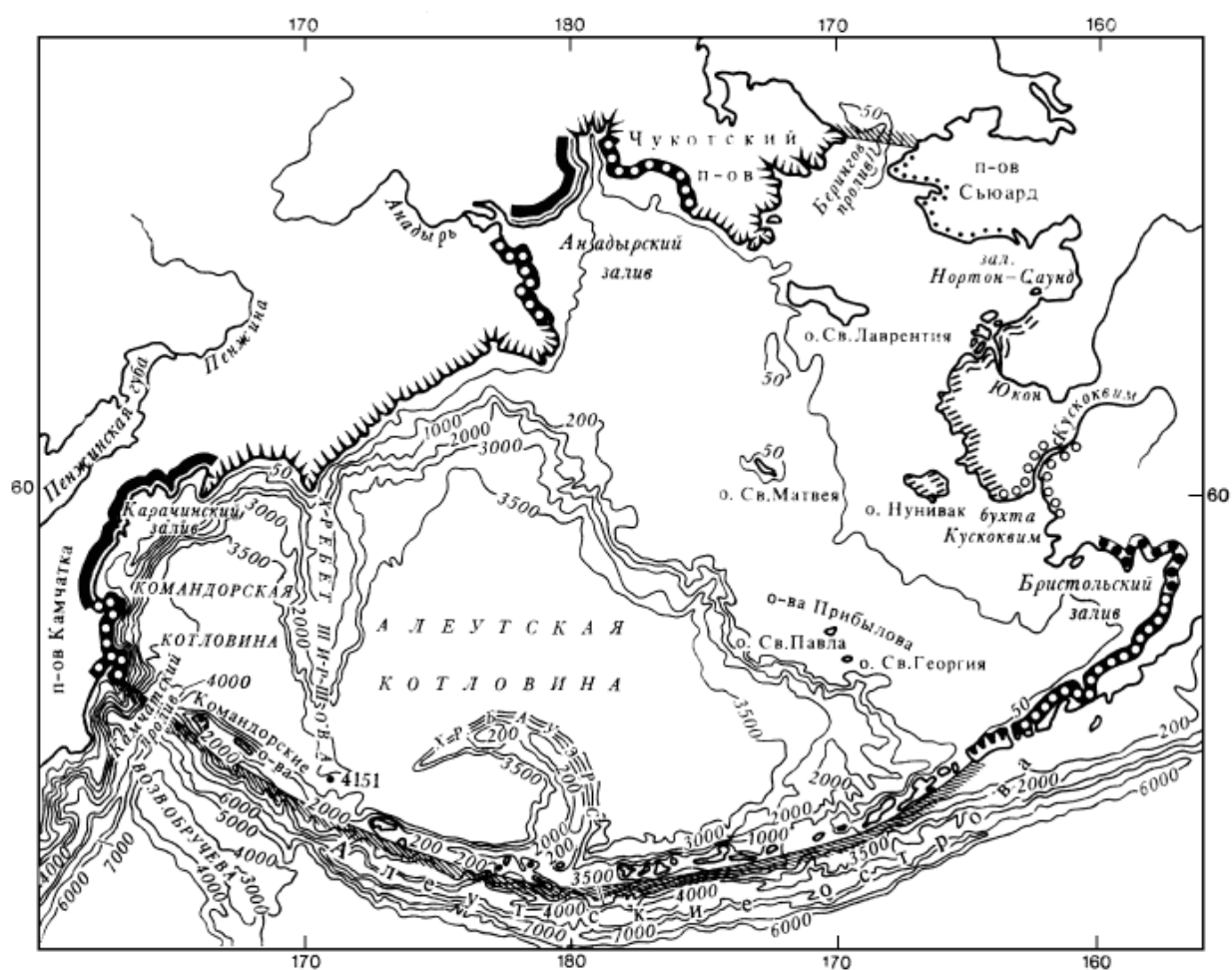


Рисунок 2.1 – Типы берегов и рельеф дна Берингова моря

Цепь Командорских и Алеутских островов – южная граница Берингова моря и, в то же время, - это зона водообмена моря с Тихим океаном. Протяженность Командоро-Алеутской гряды - 2260 км. Командоро-Алеутская гряда расчленена на ряд архипелагов: острова Командорские, Ближние, Крысьи, Андреяновские, Четырехсопочные и Лисьи. Острова поднимаются с глубины около 7 км в Алеутском желобе в Тихом океане и с глубины 4 км во впадине Берингова моря. Наиболее глубокие и широкие проливы Командоро-Алеутской гряды располагаются на западе. Камчатский пролив, достигающий глубины до 4420 метров и пролив Ближний, глубина которого – около 1600 метров. В центральной части гряды находятся проливы: Амчитка – до 1082 метров в глубину, 100 километров в ширину. Глубина восточных проливов – не превышает 250 м. Глубина самого восточного пролива гряды Унимак составляет 82 метров в глубину [2].

Цепь Командорских и Алеутских островов – южная граница Берингова моря и, а также является зоной водообмена с Тихим океаном.

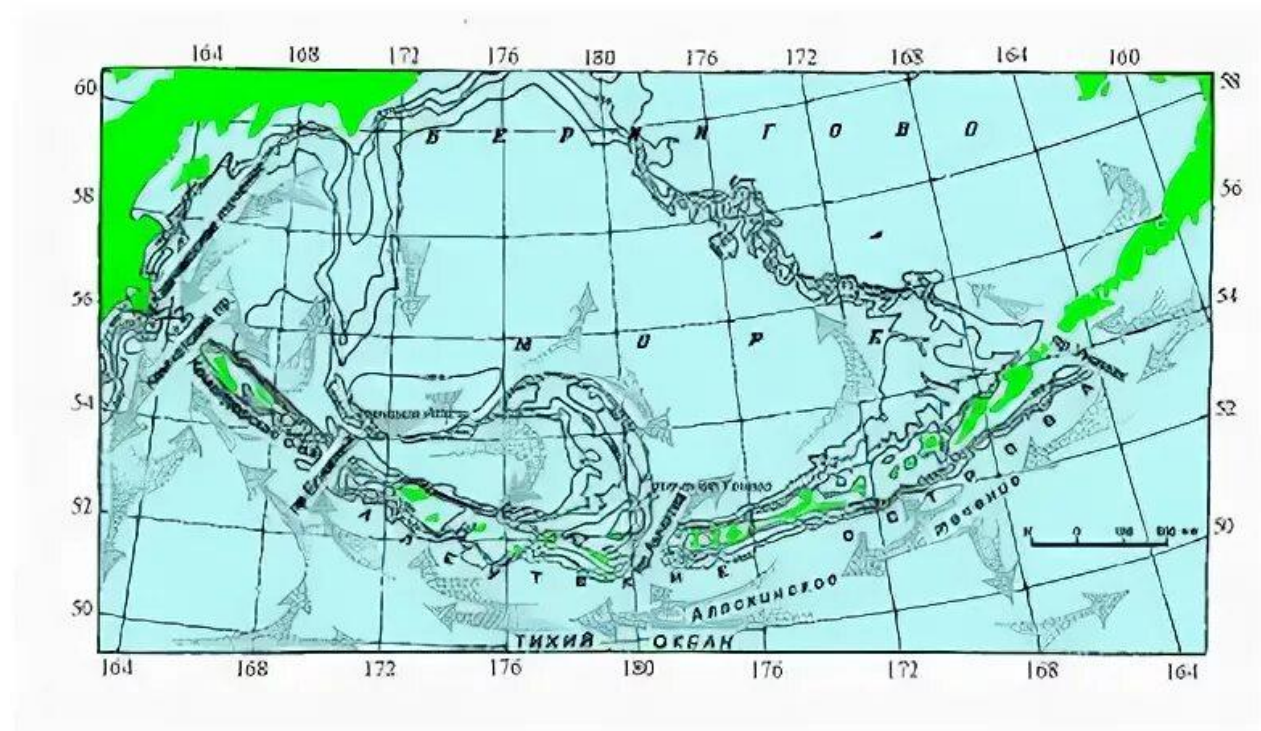


Рисунок 2.2 – Командоро-Алеутская гряда и прилегающие акватории

Протяженность Командоро-Алеутской гряды - 2260 км. Она расчленена на ряд архипелагов: острова Командорские, Ближние, Крысьи, Андреяновские, Четырехсопочные и Лисьи Острова поднимаются с глубины около 7 км в Алеутском желобе в Тихом океане и с глубины 4 км во впадине Берингова моря. Наиболее глубокие и широкие проливы Командоро-Алеутской гряды располагаются на западе. Это - Камчатский пролив и пролив Ближний. В центральной части гряды - пролив Амчитка. Глубина проливов восточнее 1710 в.д. не превышает 250 м. Самый восточный пролив гряды – Унимак с глубиной 82 м.

Протекающие в зоне проливов гряды и прилегающих акваториях динамические процессы отличаются чрезвычайной интенсивностью, а поля гидрологических характеристик – резкой и разномасштабной пространственной неоднородностью, что характерно для тихоокеанских островных дуг [2].

2.2. Климатические особенности

Влияние на формирование климата оказывают прилегающая суша, открытый Тихий океан на юге и близость полярного бассейна, а также соответственно развивающихся над ними центры действия атмосферы. Климат северной части моря арктический и субарктический, с выраженными континентальными чертами, в то время как в южной части — умеренный, морской.

Зимой под влиянием Алеутского минимума давления воздуха над Беринговым морем развивается циклональная циркуляция, благодаря которой восточная часть моря, куда приносится воздух с Тихого океана, оказывается теплее западной части, находящейся под влиянием холодного арктического воздуха. В этот сезон часты штормы, повторяемость которых в отдельных местах достигает вплоть до 47 процентов в месяц.

Гидрологический режим определяется климатическими условиями, водообменом с Чукотским морем и Тихим океаном, материковым стоком и

опреснением поверхностных вод моря при таянии льдов. Температура поверхности воды в феврале на юге и юго-западе достигает 2°C , на остальной части моря ниже -1°C . В августе температура повышается до $5^{\circ}-6^{\circ}\text{C}$ в северной части и $9^{\circ}-10^{\circ}\text{C}$ на юге.

Соленость моря значительно ниже, чем в океане. Это связано в том числе с большим количеством впадающих рек, то есть речные воды и таяние льдов оказывают сильное влияние на соленость. Льды начинают образовываться, примерно, с сентября по октябрь. С февраля до марта льдами покрыта почти вся поверхность. Большую часть года Берингово море покрыто плавучими льдами [30].



Рисунок 2.3 – Температура поверхности Берингова моря 20.01.2024



Рисунок 2.4 – Температура поверхности Берингова моря 20.04.2024



Рисунок 2.5 – Температура поверхности Берингова моря 20.07.2024



Рисунок 2.6 – Температура поверхности Берингова моря 20.10.2024

Как упоминалось ранее, Берингово море обширно и почти полностью находится в субарктической климатической зоне, в то время как крайняя северная часть относится к арктической зоне, а самая южная часть — к зоне умеренных широт. В соответствии с этим имеют место определенные климатические различия между разными районами моря. К северу от 55—56° северной широты в климате моря, особенно его прибрежных районов, заметно выражены черты континентальности, но на удаленных от берегов пространствах

они проявляются значительно слабее. Южнее этих параллелей климат мягкий, типично морской. Для такого климата характерны небольшая суточная и годовая амплитуды температуры воздуха, большая облачность и большое количество осадков. По мере приближения к берегу влияние океана на климат уменьшается. Западные районы моря холоднее восточных, что связано с фактом более сильного охлаждения и менее существенного прогрева прилегающей к морю части азиатского материка, чем американского. На протяжении года Берингово море находится под воздействием постоянных центров действия атмосферы — Полярного и Гонолульского максимумов, положение и интенсивность которых непостоянны от сезона к сезону и соответственно изменяется степень их влияния на море. Кроме того, оно испытывает воздействие и сезонных крупномасштабных барических образований: Алеутского минимума, Сибирского максимума, Азиатской и Нижнеамериканской депрессий. Их сложное взаимодействие обуславливает определенные сезонные особенности атмосферных процессов.

В холодное время года, особенно зимой, море испытывает влияние в особенности Алеутского минимума, а также Полярного максимума и Якутского отрога Сибирского антициклона. Иногда ощущается воздействие Гонолульского максимума, который в это время года занимает крайнее юго-восточное положение. Такая синоптическая обстановка приводит к большому разнообразию ветров над акваторией. В это время здесь с большей или меньшей повторяемостью наблюдаются ветры почти всех направлений. Однако преобладают северо-западные, северные и северо-восточные ветры. Их суммарная повторяемость равна 50—70%. Только в восточной части моря южнее 50° северной широты в 30—50% случаев, что достаточно часто, наблюдаются южные и юго-западные ветры, а местами и юго-восточные. Скорость ветров в прибрежной зоне в среднем 6—8 м/с, а в открытых районах она изменяется от 6 до 12 м/с, причем увеличивается с севера на юг.

Ветры северных, западных и восточных румбов несут с собой с Северного Ледовитого океана холодный морской арктический воздух, а с азиатского и

американского материков холодный и сухой континентальный полярный и континентальный арктический воздух. Ветра южных направлений приносят морокой полярный, а иногда и морской тропический воздух. Над морем преимущественно взаимодействуют массы континентального арктического и морского полярного воздуха, на стыке которых образуется арктический фронт. Он расположен несколько севернее Алеутской дуги и протягивается в общем с юго-запада на северо-восток. На фронтальном разделе этих воздушных масс образуются циклоны, перемещающиеся примерно с юго-запада на северо-восток. Передвижение этих циклонов способствует усилению северных ветров на западе и ослаблению их или даже перемене на южные да востоке моря.

Большие градиенты давления, обусловленные Якутским отрогом Сибирского антициклона и Алеутским минимумом, вызывают очень сильные ветры в западной части моря. Во время штормов скорость ветра часто достигает 30—40 м/с. Обычно штормы продолжаются около суток, но иногда они с некоторым ослаблением длятся 7—9 дней. Число дней со штормами в холодное время года равно 5—10, местами до 15—20 в месяц.

Зимой температура воздуха понижается с юга на север. Температуры в среднем по месяцу – у самых холодных равны $+1 - 4^{\circ}$ в юго-западной и южной частях моря и $-15 - 20^{\circ}$ в его северных и северо-восточных районах, стоит уточнить, что в открытом море температура воздуха выше, чем в прибрежной зоне. У берегов Аляски она может достигать $-40 - 48^{\circ}$. На открытых пространствах температура ниже -24° не наблюдается.

В теплое время года происходит перестройка барических систем. Начиная с весны уменьшается интенсивность Алеутского минимума, летом он выражен очень слабо. Исчезает Якутский отрог Сибирского антициклона, Полярный максимум смещается к северу, а Гонолульский максимум занимает свое крайнее северо-западное положение. В результате сложившейся синоптической обстановки в теплые сезоны преобладают юго-западные, южные и юго-восточные ветры, повторяемость которых равна 30—60%. Их скорость в западной части открытого моря от 4 до 5 м/с, а в его восточных районах от 4 до

7 м/с. В прибрежной зоне скорость ветра меньше. Уменьшение градиентов атмосферного давления над морем вызывает снижение скорости ветра по сравнению с зимними значениями. Летом арктический фронт располагается несколько южнее Алеутских островов. Здесь зарождаются циклоны, с прохождением которых связано значительное усиление ветров. В летнее время повторяемость штормов и скорости ветра меньше, чем зимой. Только в южной части моря, куда проникают тропические циклоны, или же тайфуны, вызывают сильнейшие штормы с ветрами ураганной силы. Тайфуны в Беринговом море наиболее вероятны с июня по октябрь, наблюдаются обычно не более одного раза в месяц и продолжаются несколько дней.

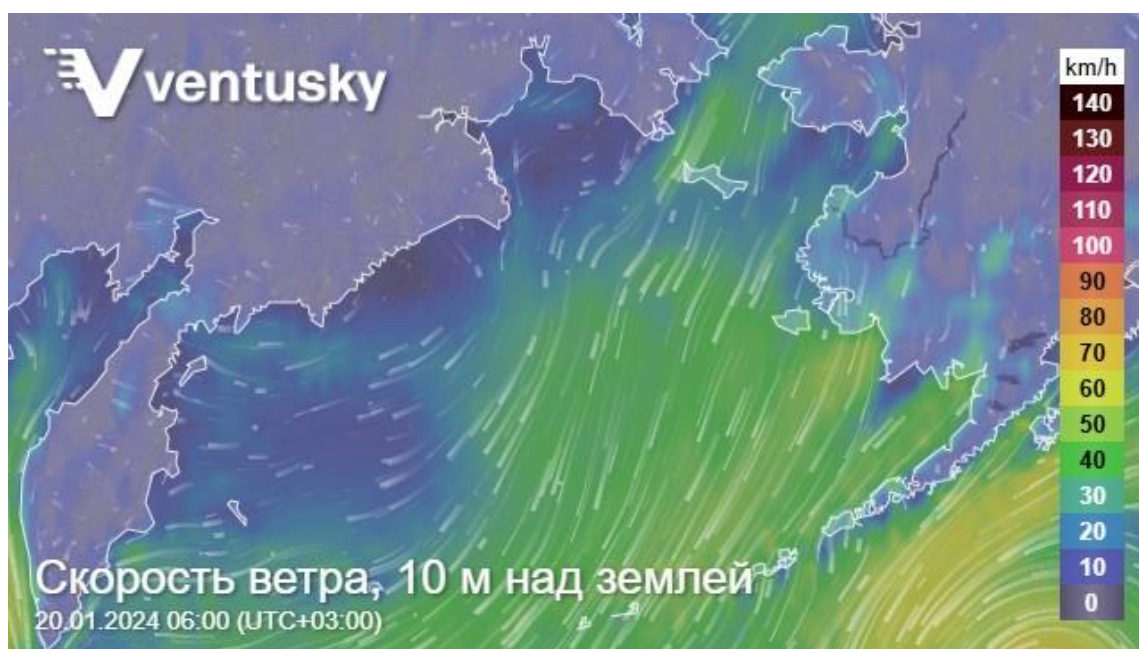


Рисунок 2.7– Скорость ветра в Беринговом море (10 метров над землей)
20.01.2024

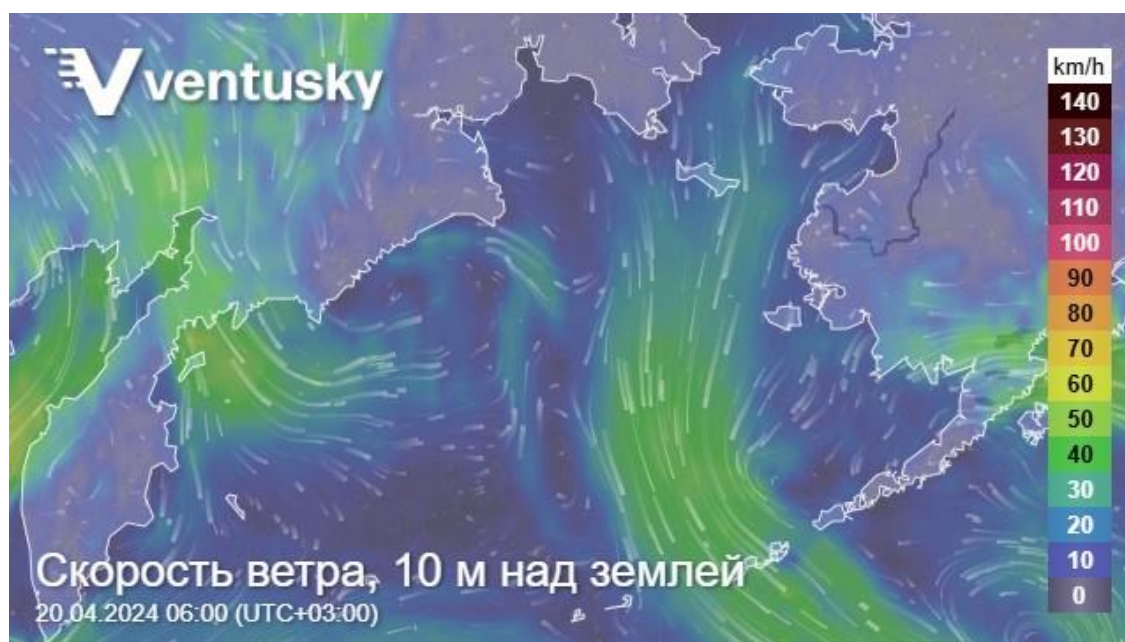


Рисунок 2.8 – Скорость ветра в Беринговом море (10 метров над землей)
20.04.2024

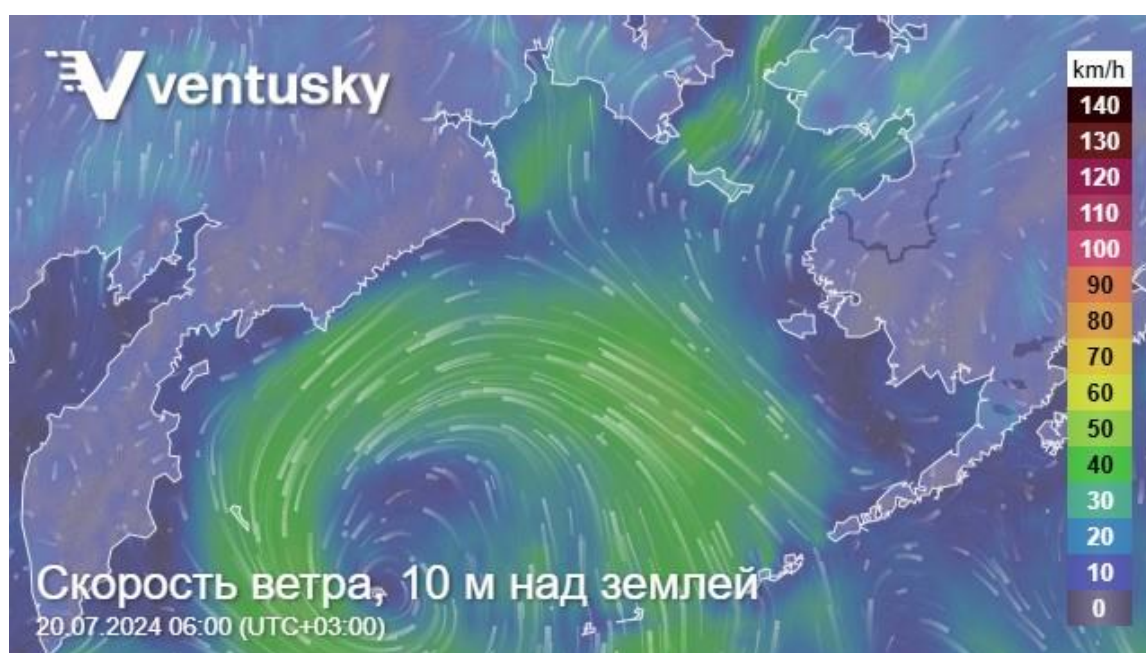


Рисунок 2.9 – Скорость ветра в Беринговом море (10 метров над землей)
20.07.2024

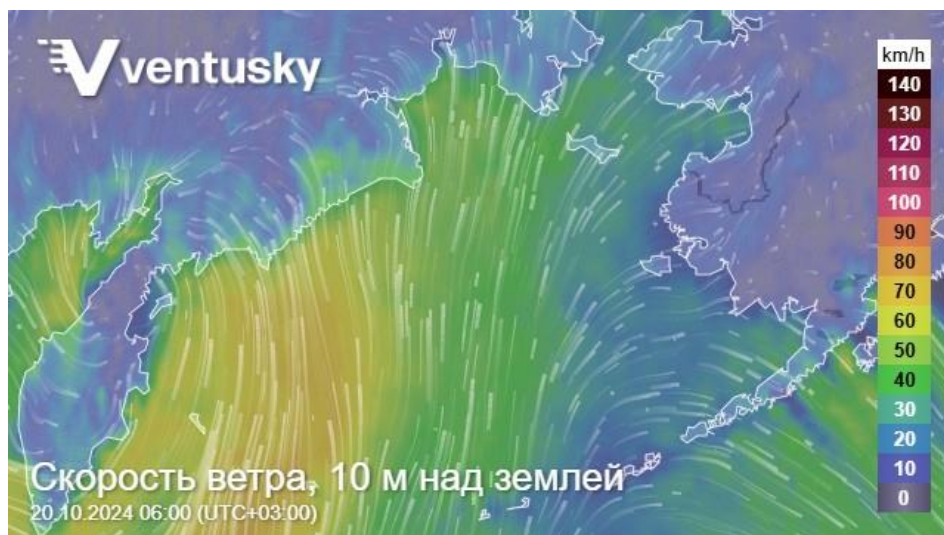


Рисунок 2.10 – Скорость ветра в Беринговом море (10 метров над землей)
20.10.2024

Температура воздуха летом понижается с юга на север и несколько выше в восточной части моря, чем в западной. Среднемесячные величины температуры воздуха самых теплых месяцев (июля и августа) в пределах моря изменяются примерно от 4 до 13°, причем у берегов они выше, чем в открытом море. К основным сезонным особенностями погоды на Беринговом море можно отнести мягкую зиму на юге, холодную на севере, и пасмурное и прохладное лето по всей площади.



Рисунок 2.11– Температура воздуха в Беринговом море (2 метра над землей)
20.01.2024



Рисунок 2.12 – Температура воздуха в Беринговом море (2 метра над землей)
20.04.2024



Рисунок 2.13 – Температура воздуха в Беринговом море (2 метра над землей)
20.07.2024



Рисунок 2.14 – Температура воздуха в Беринговом море (2 метра над землей)
20.10.2024

При громадном объеме вод, Берингово море не отличается большим материковым стоком, он составляет около 400 км³ в год. Подавляющее большинство речной воды попадает в его самую северную часть, куда впадают наиболее крупные реки, как показано в таблице 2.1. Около 85% годового стока приходится на летние месяцы. Влияние речных вод на морские ощущается в основном в прибрежной зоне на северной окраине моря в летнее время.

Таблица 2.1 – Речной сток крупнейших рек Берингова моря

Название реки	Речной сток
Юкон	176 км ³
Кускоквим	50 км ³
Анадырь	41 км ³

Географическое положение, огромные пространства, относительно хорошая связь с Тихим океаном через проливы Алеутской гряды на юге и крайне ограниченное сообщение с Северным Ледовитым океаном через Берингов пролив на севере служат определяющими факторами формирования гидрологических условий Берингова моря. Составляющие его теплового

бюджета зависят главным образом от климатических показателей и в значительно меньшей степени от прихода-расхода тепла течениями. В связи с этим неодинаковые климатические условия в северной и южной частях моря влекут за собой различия в тепловом балансе каждой из них, что соответственно сказывается на температуре воды в море.

Для его водного баланса решающее значение имеет водообмен через Алеутские проливы, через которые поступают очень большие количества поверхностных и глубинных тихоокеанских вод и вытекают воды из Берингова моря. Осадки и речной сток невелики по отношению к огромной площади моря, поэтому они существенно менее значимы в приходе-расходе влаги, чем водообмен через Алеутские проливы.

Известно, что большие массы поверхностной воды выходят из моря в океан через Камчатский пролив. Подавляющее количество глубинной океанской воды поступает в море в трех районах: через восточную половину пролива Ближнего, почти через все проливы островов Лисьих, через проливы Амчитка, Танага и другие между Крысьими и Андреяновскими островами. Возможно, что более глубокие воды проникают в море через Камчатский пролив если не постоянно, то периодически или спорадически. Водообмен между морем и океаном влияет на распределение температуры, солености, формирование структуры и общей циркуляции вод Берингова моря [1].

Берингово море является самым северным из дальневосточных морей и самым суровым по климатическим характеристикам и ледовым условиям. Зимой и весной примерно половина площади его акватории покрыта неподвижными и дрейфующими льдами. Почти вся масса льдов образуется и тает непосредственно в пределах бассейна моря. В целом продолжительность ледового периода в зависимости от суровости зимы составляет 80-252 дней в теплые зимы, 120-294 – в умеренные и 170-365 – в суровые зимы. Соответственно различными для отдельных лет являются площади ледяного покрова и время наступления максимума ледовитости. В теплые зимы льдом покрывается около 20% площади моря, а максимум ледовитости приходится на

конец февраля. В умеренные и суровые зимы лед покрывает, соответственно, до 37 и 56% площади, а время наступления максимума ледовитости смещается на первую половину апреля. В этом месяце кромка льда идет от Бристольского залива через острова Прибылова и далее на запад по 57-58⁰ с. ш. Далее, в центральной части бассейна, она постепенно опускается на юг, к Командорским островам, и проходит вдоль побережья до южной оконечности п-ова Камчатка. Южная часть моря не замерзает круглый год.

Процесс льдообразования начинается в северо-западной части Берингова моря, где льды появляются в октябре и постепенно сносятся к югу. В Беринговом проливе, в заливах Анадырском и Нортон лед можно встретить уже в сентябре. В ноябре-декабре плавучие льды появляются у п-ва Камчатка и Командорских островов. Зимой вся северная часть моря заполняется тяжелыми, непроходимыми льдами толщиной до 6 м. Под влиянием ветров и течений ледяные поля находятся в движении. В результате периодического сжатия и разряжения в ледяном покрове образуются торосы высотой до 20 м, полыньи и разводья. Некоторая часть льда выносится на север, в Чукотское море.

Во второй половине апреля начинается процесс очищения моря от льда. Кромка льда быстро смещается к северу и в июне-июле море полностью очищается от льда. Однако в западной половине Берингова пролива лед может встречаться на протяжении всего года. На характеристики ледового режима заливов, бухт и отдельных проливов сильное влияние оказывают ветры нагонных и отжимных направлений. Статистические характеристики распределения по акватории и изменчивости различных параметров ледяного покрова сравнительно хорошо изучены на основании многолетнего ряда наблюдений и подробно описаны в специальной литературе [2].

ФГБУ «НИЦ«Планета» предоставляет свободный доступ к архиву карт ледовой обстановки в морях СЛО, с помощью которых можно провести анализ или сравнение скоплений льда в разные сезоны и года.

1) Ледовая обстановка в Беринговом море по спутниковым данным на 11-13 декабря 2023 г.

В Беринговом море, в начале II декады декабря 2023 года в заливе Креста и Анадырском были отмечены самые низкие показатели температуры воздуха, составившие от -21 до -27°C . На севере, северо-западе ледообразование ускорилося, и продолжились на востоке и северо-востоке.

По данным НИЦ «Планета», на севере Берингова моря, к западу от островов Диомиды, вдоль побережья от мыса Дежнева до мыса Чаплина существенно увеличилась площадь дрейфующего серо-белого, серого и ниласового льда. Молодые льды и нилас покрыли почти всю западную часть Берингова пролива, вплоть до 168° з.д. В Мечигменской губе и заливе Лаврентия сформировался припайный лед возраста молодого. Отмечено появление ниласа и начальных видов льда и вдоль юго-восточного побережья о-ва Св. Лаврентия.

Увеличилась площадь дрейфующего льда и в Анадырском заливе. На западе залива преобладает сплоченный серый и серо-белый лед с заснеженностью 2 балла, на севере — вдоль побережья образовалась полынья, покрытая темным ниласом. В заливе Креста и Анадырском лимане наблюдается малоподвижный сплоченный серо-белый лед.

В мелких бухтах и заливах материкового побережья, от мыса Наварин до Олюторского залива, а также в заливах Корфа, Анапка, Уала, Кичигинском продолжается образование начальных видов льда и ниласа, сплоченностью от 8-10 до 4-6 баллов.

На северо-востоке Берингова моря, залив Нортон (США) почти полностью покрыт сплоченным молодым льдом. От дельты Юкона в направлении на юг, вдоль материкового побережья, до мыса Ньюэнхем сохраняется припай возраста молодого льда, мористее преобладает ниласовый лед. Залив Кукоквим покрыт сплоченным серым льдом и ниласом. На востоке Бристольского залива — начальные виды льда и нилас.

Сравнение ледовых карт, показанных на рисунках 2.15 и 2.16, построенных по спутниковым данным в НИЦ «Планета» в начале II декады декабря 2023 и 2022 гг. показывает, что ледовитость Берингова моря в 2023 г. составила 6,78%, это на 3,20% больше, чем в предшествующем году.

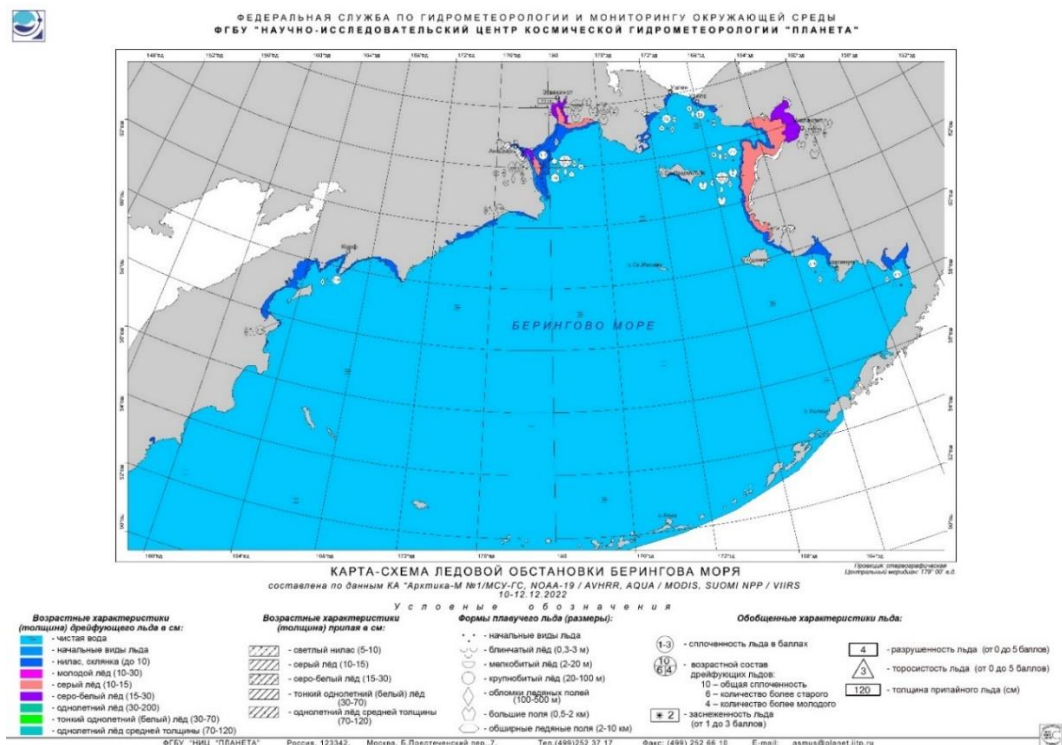


Рисунок 2.15 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.
10-12 декабря 2022 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

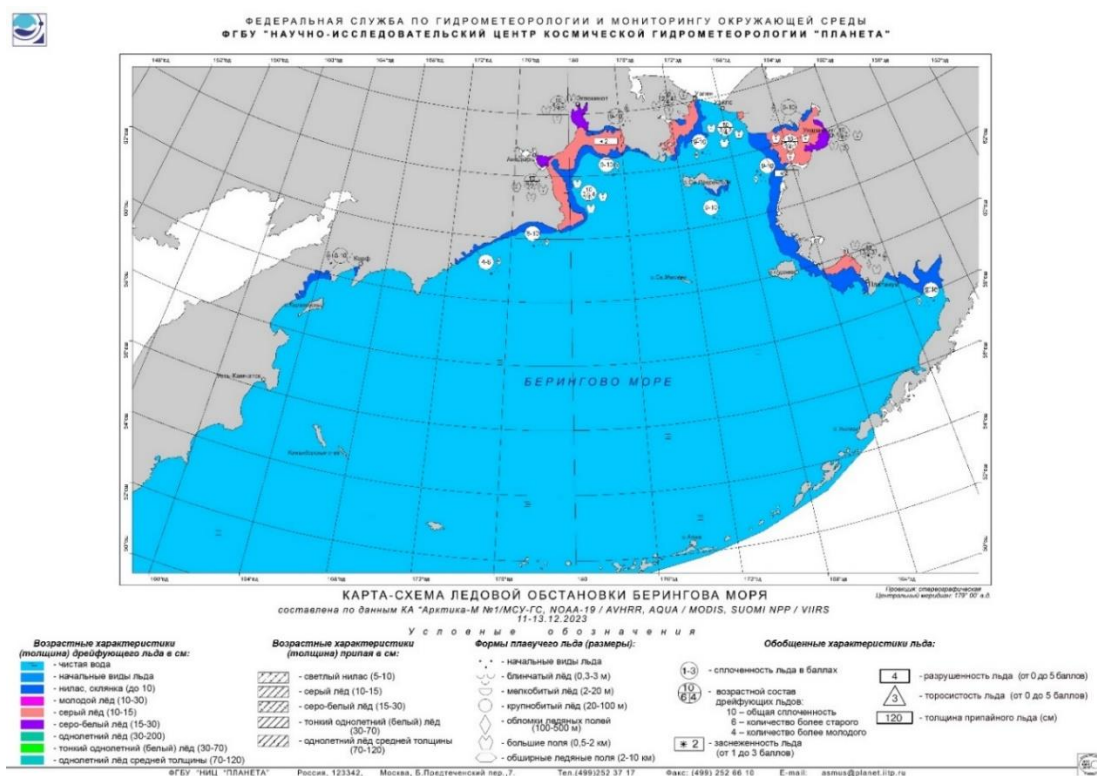


Рисунок 2.16 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.
11-13 декабря 2023 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

2) Ледовая обстановка в Беринговом море по спутниковым данным на 15-17 января 2024 г.

В середине II декады января 2024 года погодные условия над Беринговым морем определялась циклоном. На фоне слабоотрицательных температур ($-3 \dots -1^{\circ}\text{C}$) и умеренных ветров юго-восточной четверти (4-6 м/с) продолжилось ледообразование почти на всей акватории Берингова моря, отметилось перераспределение дрейфующего льда в центральной и восточной частях моря.

По данным спутникового мониторинга НИЦ «Планета» в Беринговом проливе наблюдаются сплоченные и очень сплоченные восторошенные тонкие однолетние льды, заснеженностью 1-2 балла.

Вдоль северо-восточного побережья Мечигменского залива п-ва Чукотка, вдоль западного побережья острова Аракамчечен, в бухтах Аболешева и Пэнкигнгэй, в заливе Ткачен и в проливе Сенявина сохраняется припайный лед возраста тонкого однолетнего льда.

Вдоль западного побережья залива Креста, в бухтах Этелькийим, Кэнгынин – малоподвижный лед возраста тонкого однолетнего. Бухта Клинковстрема, залив Канчаланский, Малый Онемен и вся акватория залива Онемен, лагуна Тымна покрыта припаем возраста тонкого однолетнего льда. На западе Анадырского залива, от мыса Гека до мыса Наварин, наблюдаются сплоченные, поджатые к материковому побережью восторошенные тонкие и молодые льды. Мористее, в центральной части Анадырского залива наблюдаются тонкие однолетние льды, серо-белые и серые льды, сплоченностью 9-10 баллов, заснеженностью 2-3 балла.

На 15-17 января 2024 года на северо-западе Берингова моря южная кромка льда в районе 178° в.д. – 178° з.д. проходит в районе $60^{\circ}58'$ северной широты.

За неделю вдоль материкового побережья, от мыса Наварин до мыса Олюторский, в заливах Кичигинский, Уала, Анапка и Корф увеличилась площадь, покрытая начальными видами льда, ниласом и молодым льдом, сплоченностью 8-10...9-10 баллов.

В западной части залива Уала, в бухтах Оссора и Карага, в лагуне Тымлат и в Укинской губе сохраняется малоподвижный лед возраста тонкого однолетнего льда.

Пролив Литке покрыт начальными видами льда, ниласовым и молодым льдом с включением тонкого однолетнего льда, сплоченностью 8-10...9-10 баллов.

В заливе Озерной наблюдаются сплоченные и очень сплоченные начальные виды льда, ниласовые и молодые льды. В Авачинской губе Авачинского залива отмечаются молодые льды и нилас.

На северо-востоке Берингова моря, в заливе Нортон (США), бухты Головнина и Нортон покрыты припайным тонким однолетним льдом. В центральной части залива Нортон дрейфующий лед разрядило, в этой акватории отмечается разреженный дрейфующий молодой лед.

В восточной части Берингова моря, в Бристольском заливе, кромка начальных, ниласовых и молодых льдов отмечается в районе $58^{\circ}22'$ с.ш. (158 з.д.). В центральной части Берингова моря кромка дрейфующего льда поднялась к северу от о. Св.Матвея к $61^{\circ}40'$ с.ш. (172 з.д.).

Ледовые карты, построенные по спутниковым данным в НИЦ «Планета» в середине II декады января 2024 и 2023 гг., показаны на рисунках 2.17 и 2.18.

Сравнение этих ледовых карт, показывает, что ледовитость Берингова моря в 2024 г. составила 16,98%, это на 5,41% меньше, чем в предшествующем году.

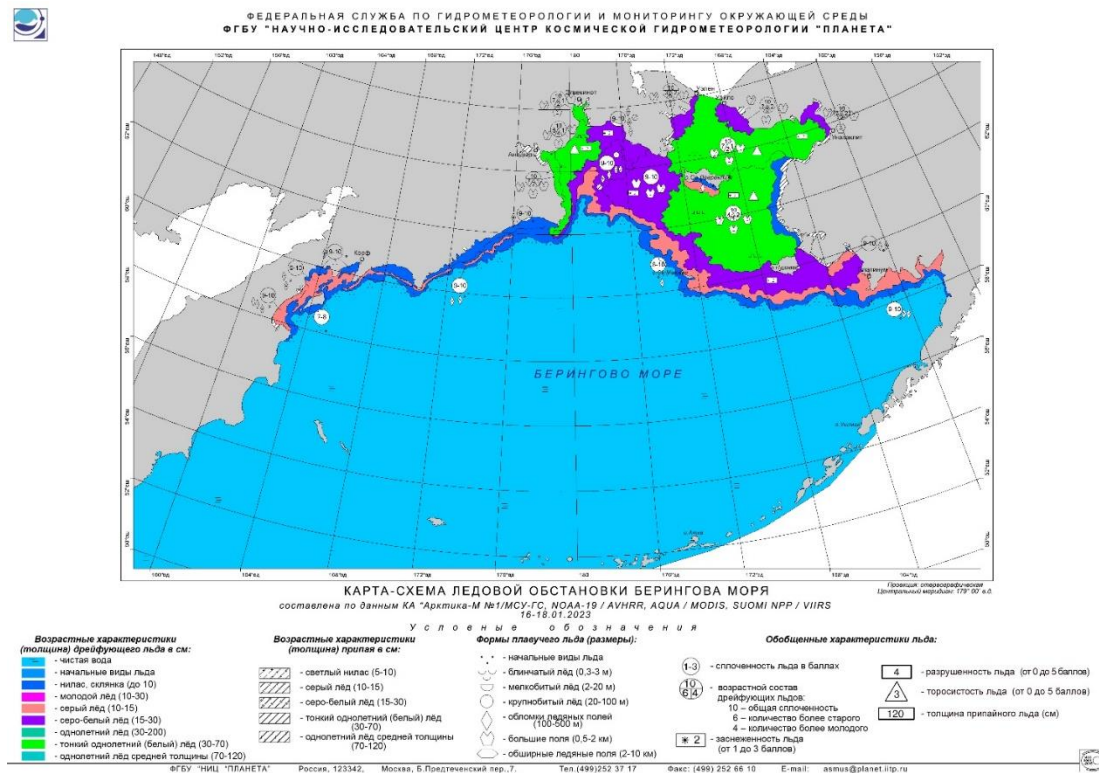


Рисунок 2.17 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.
16-18 января 2023 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

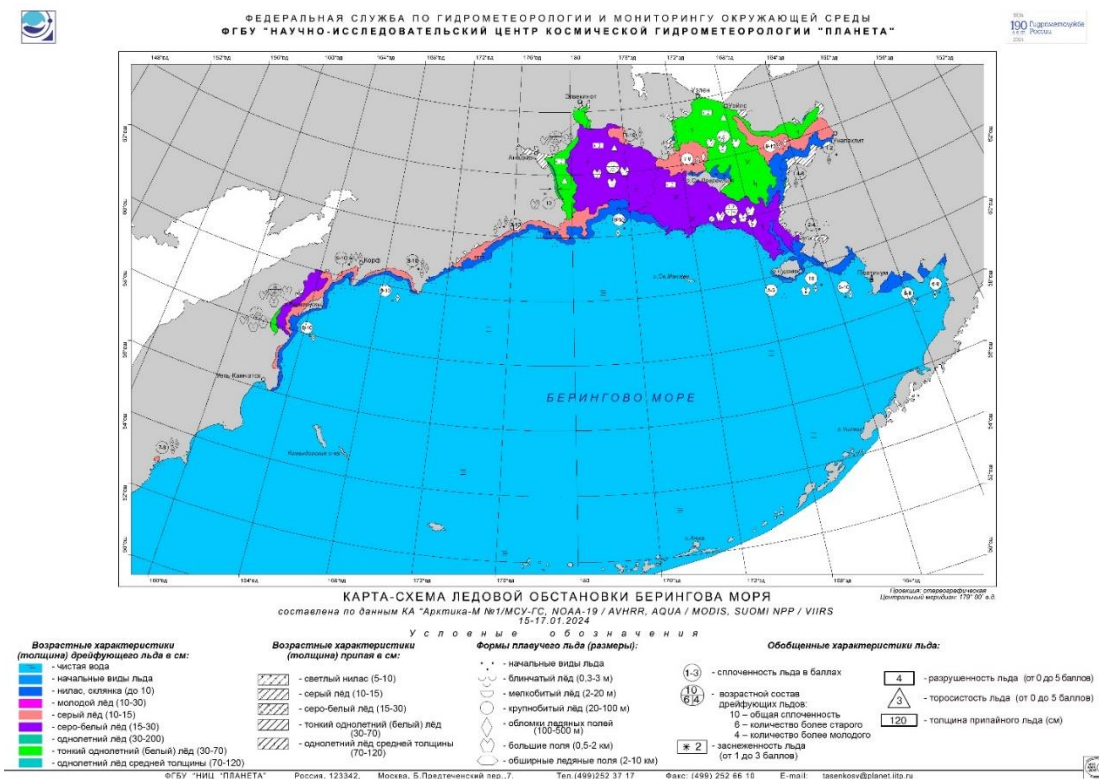


Рисунок 2.18 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.
15-17 января 2024 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

3) Начало ледообразования в Беринговом море. Ледовая обстановка в Беринговом море по спутниковым данным на 12-14 октября 2024 г.

В начале II декады октября 2024 года адвекция холодного арктического воздуха в тыловой части циклона над северной частью Берингова моря способствовала понижению температуры воздуха до $-14...-12^{\circ}\text{C}$ и началу ледообразования на северо-западе и северо-востоке Берингова моря.

По данным спутникового мониторинга НИЦ «Планета» на северо-западе Берингова моря, в вершинах заливов Малый Онемен и Онемен, Канчалан, в устье реки Анадырь, на северо-востоке залива Креста отмечено образование начальных видов и ниласового льда, сплоченностью 9-10 баллов.

Вдоль южного и юго-западного побережья Анадырского лимана, в Гнилом Углу Анадырского лимана – поджатая к материковому побережью зона очень сплоченных ниласовых льдов, на кромке – начальные виды льда. Начало ледообразования началось в лагуне Тымна и в проливе Каманавыте, в этой акватории наблюдается разреженный лед (4-6 баллов).

Началось ледообразование и на северо-востоке Берингова моря. Начальные виды льда и ниласовый лед, сплоченностью 8-10, 9-10 баллов, наблюдается в северо-восточной части залива Нортон и в лагуне Головина (США).

Ледовые карты, построенные по спутниковым данным в НИЦ «Планета» в начале II декады октября 2024 и 2023 гг., показаны на рисунках 2.19 и 2.20.

Сравнение ледовых карт показывает, что ледовитость Берингова моря в 2024 г. составила 0,17%, это на 0,03% больше, чем в прошлом году.

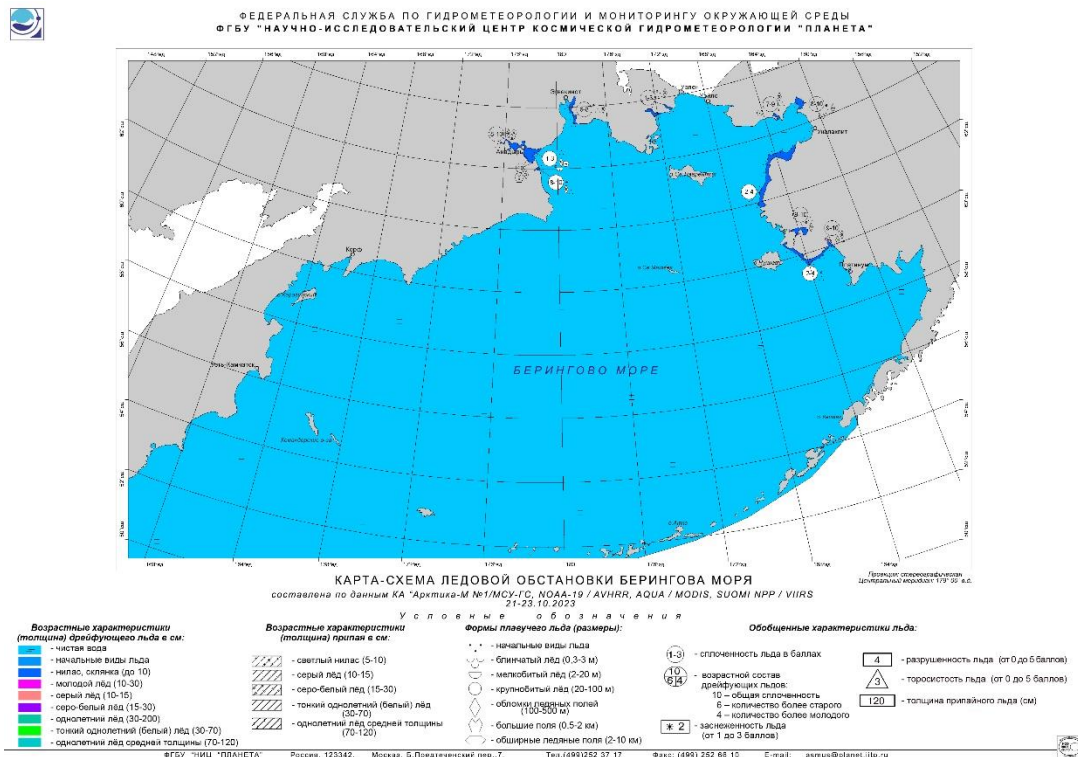


Рисунок 2.19 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.

24-23 октября 2023 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"



Рисунок 2.20 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.

12-14 октября 2024 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

4) Ледовая обстановка в Беринговом море по спутниковым данным на 9-11 ноября 2024 г.

В конце I декады ноября 2024 года погода на большей части Берингова моря определялась тыловой частью глубокого циклона с центром над Алеутскими островами.

На фоне отрицательных температур на западе и в центральной части моря ($-9...-4^{\circ}\text{C}$) и -15°C – на востоке моря, ветра восточной и северной четвертей (2-7 м/с, с порывами до 12 м/с) на севере моря продолжились процессы ледообразования.

По данным спутникового мониторинга НИЦ «Планета» на западе Берингова пролива, в мелких бухтах и заливах материкового побережья отмечается зона сплоченного серого льда и ниласа.

В Мечигментском заливе, заливах Лаврентия, Ткачен, Бухтах Провидения, Пэнкигнэй и Аболешева – ниласовый лед, в Мечигментской губе – серый лед и нилас, сплоченностью 8-10 баллов. На севере Анадырского залива вдоль материкового побережья протянулась с запада на восток зона сплоченного ниласового льда. На севере и востоке залива Креста сохраняются начальные виды льда, ниласовый и серый лед, сплоченностью 6-8-10 баллов.

В заливах Малый Онемен и Онемен, Канчалан, в устье реки Анадырь, а также в лагуне Тымна и вдоль южного побережья Анадырского лимана – молодой лед. Сплоченность ниласа, серого и серо-белого льда – от 5-7 до 10 баллов.

На западе Анадырского залива от мыса Гека до бухты Угольной отмечается зона дрейфующего в южном направлении ниласового льда, сплоченностью 8-10 баллов.

Началось ледообразование на западе, в бухтах Анастасии и Дежнева. В вершинах заливов Корфа, Уала, Анапка и Кичигинском, а также на юге Карагинского залива в Укинской губе наблюдаются начальные виды льда и нилас.

Активное ледообразование продолжается на северо-востоке Берингова моря. В бухте Порт-Кларенс сохраняется ниласовый лед, сплоченностью 8-10 баллов. В заливе Нортон и лагуне Головина (США) – серый и серо-белый лед, светлый и темный нилас, сплоченностью 8-10, 9-10 баллов.

Начальные виды льда и нилас сохраняются вдоль юго-западного побережья залива Нортон до острова Нельсон, на востоке о. Нунивак и в заливе Кускоквим.

Сравнение ледовых карт, представленных на рисунках 2.21 и 2.22, построенных по спутниковым данным в НИЦ «Планета» в конце I декады ноября 2024 и 2023 гг. показывает, что ледовитость Берингова моря в 2024 г. составила 1,49%, это на 0,81% больше, чем в прошлом году [33].

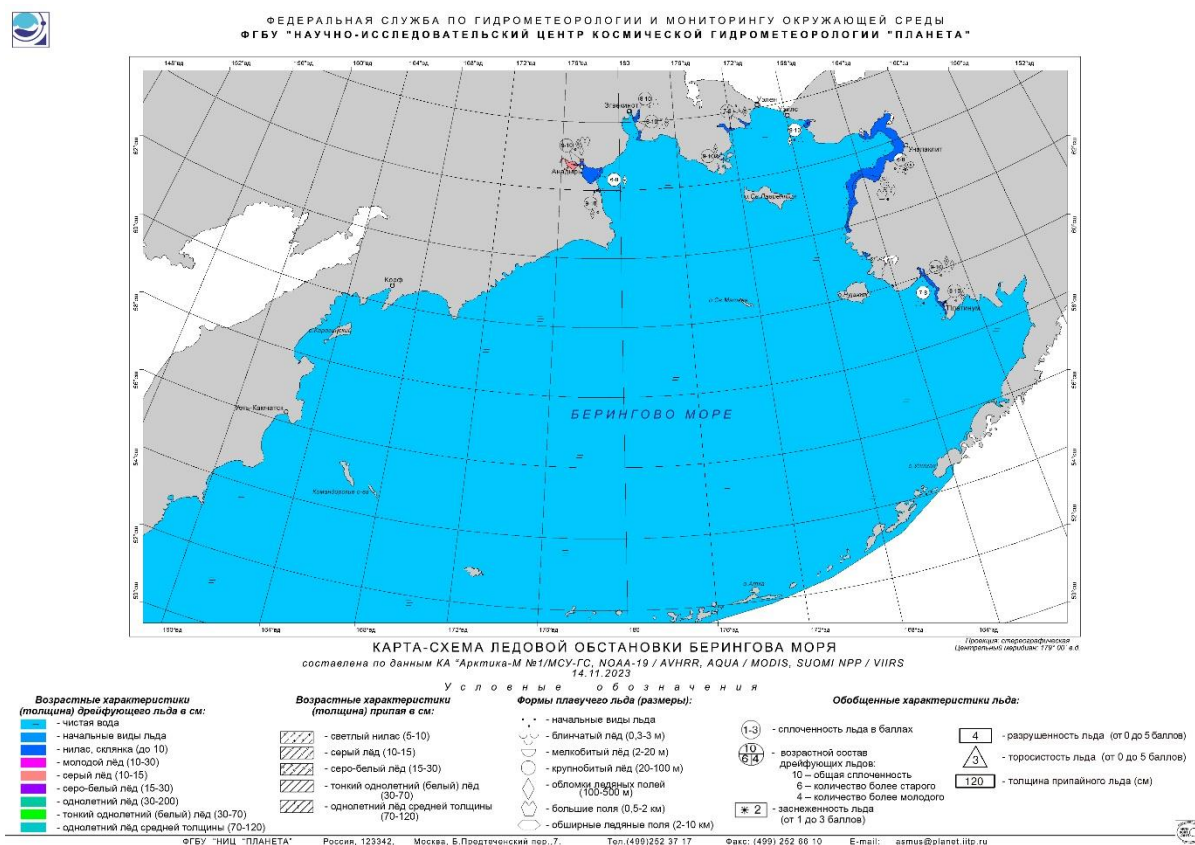


Рисунок 2.21 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.

14 ноября 2023 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

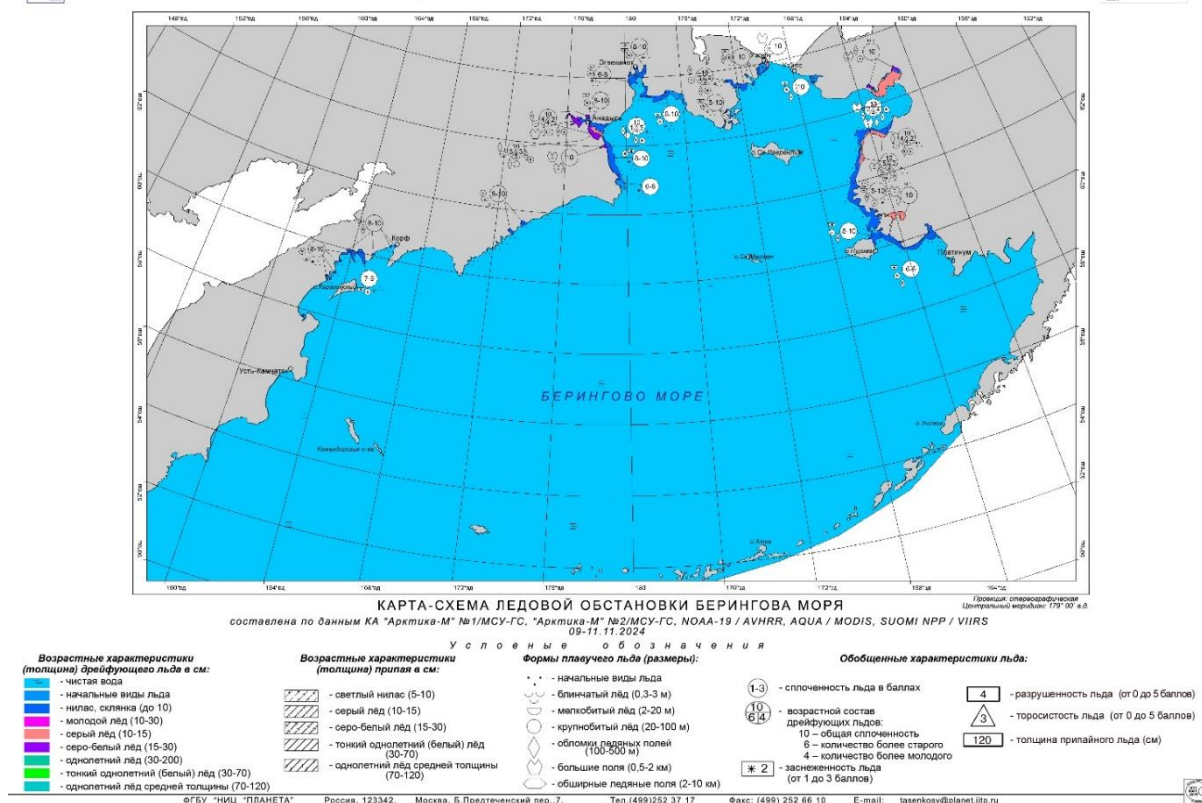


Рисунок 2.22 – Карта-схема ледовой обстановки Берингова моря.

9-11 ноября 2024 г. По материалам: ФГБУ "НИЦ "Планета"

2.3. Сезонная изменчивость течений

Поверхностные течения образуют круговорот против часовой стрелки, по восточной периферии которого следуют на север теплые воды из Тихого океана — берингоморская ветвь системы теплых течений Куро시오. Часть этих вод поступает через Берингов пролив в Чукотское море, другая часть отклоняется к западу и далее следует на юг вдоль азиатского берега, принимая холодные воды Чукотского моря. Южный поток образует Камчатское течение, которым воды Берингова моря выносятся в Тихий океан.

Основной массе вод Берингова моря свойственна субарктическая структура, главной особенностью которой является наличие холодного и теплого промежуточного слоев, составляющих самостоятельные водные массы — промежуточную берингоморскую и промежуточную тихоокеанскую. В целом,

вся толща вод глубоководной части моря летом четко разделена на четыре слоя: поверхностный, холодный промежуточный, теплый промежуточный и глубинный. На восточно-беринговоморском шельфе в это время выделяют только две водные массы: поверхностную (более высокие значения температуры и низкие – солёности) и придонную (более высокие значения солёности и более низкие – температуры).

Поверхностная водная масса (ПВМ) образуется в теплое время года в результате радиационного прогрева и распреснения вод верхнего слоя. Слой, занимаемый ПВМ, имеет толщину 20-50 м и характеризуется температурой 7-10° на поверхности и 4-6° на нижней границе и солёностью около 32-33‰. Наибольшая толщина этого слоя наблюдается в открытой части моря, а минимальные значения солёности (<31‰) – в прибрежной зоне.

Промежуточная беринговоморская водная масса (ПБВМ) образуется в результате осенне-зимнего конвективного перемешивания и последующего летнего прогрева. Глубина залегания ядра ПБВМ возрастает от 50 м на восточно-беринговоморском шельфе – до 100-150 м в центральной и южной части глубоководной котловины. Значения солёности в ядре варьируют в сезонном ходе в пределах 32-34‰. Значения температуры ядра возрастают от +1...-1° на северо-востоке (шельф) - до 3,0-3,5° у Алеутских островов. В глубоководной части моря горизонтальное распределение солёности в ядре ПБВМ более однородно чем на шельфе.

Промежуточная тихоокеанская водная масса (ПТВМ) идентифицируется в слое 100-650 (900) м во все сезоны года. Ее ядро в различных районах залегает на глубине от 250 до 500 м. Солёность в ядре ПТВМ варьирует от 33,4 до 34,0‰, а температура – от 3,4 до 4,0°.

Глубинная водная масса (ГВМ) образуется в результате поступления вод через проливы из Тихого океана и их последующей трансформации. Она занимает большую часть объема моря и характеризуется слабой пространственно-временной изменчивостью гидрологических характеристик. Ее верхняя граница располагается на глубинах 800-1200 м, а ядро с максимальными

значениями солености (около 34,7‰) и минимальными для ГВМ величинами температуры (около 1,5°) находится на дне глубоководной котловины.

В некоторых районах моря, особенно на периферии бассейна, наблюдается некоторое видоизменение основных водных масс, вертикальная расслоенность вод стирается и появляются новые обособленные водные массы, имеющие местное значение.

Поле суммарных течений в отдельных районах моря формируется в результате сочетания различных типов движений вод с разными пространственно-временными масштабами: относительно постоянными неперiodическими течениями, колебаниями сезонного и синоптического масштабов, приливными, инерционными и сгонно-нагонными явлениями. В зависимости от временного масштаба, принятого для осреднения, их характеристики могут отличаться в той или иной точке пространственных координат. Существующие схемы циркуляции вод моря базируются либо на разрозненных данных прямых наблюдений, либо получаются расчетными методами.

Главной особенностью циркуляционной системы Берингова моря является циклонический круговорот общего движения вод (против часовой стрелки) на большей части акватории. К северу от 60° с. ш. на восточно-беринговоморском шельфе прослеживается менее значительный антициклонический круговорот. Эти звенья циркуляции формируются прежде всего за счет непрерывного поступления тихоокеанских вод через проливы Командоро-Алеутской островной гряды и воздействия ветра на морскую поверхность. Основной поток тихоокеанских вод шириной 200 миль входит в море между Алеутскими и Командорскими островами и движется на север, восток и северо-восток, образуя отдельные ветви и локальные круговороты. С юга и юго-востока через Алеутские проливы со стороны Тихого океана проникают ветви Аляскинского течения, которое также оказывает существенное влияние на циркуляцию вод моря в целом. К северу от 55° с. ш. основной поток отклоняется к северо-западу и следует к корякскому побережью азиатского материка. Основной перенос вод у

западной кромки восточно-берингоморского шельфа осуществляется течением, получившим название Поперечного или Склонового берингоморского. Средняя скорость этого течения составляет 5-10 см/с, а максимальная – 10-15 см/с. По мере приближения к азиатскому материку Поперечное течение постепенно отклоняется к западу и разветвляется на два потока. Большая часть вод поворачивает вдоль побережья к югу, давая начало холодному Камчатскому течению, которое осуществляет сброс берингоморских вод в Тихий океан. Скорость этого течения составляет около 15 см/с (максимальные среднесуточные значения достигают 40-80 см/с, а в Камчатском проливе – 90-120 см/с). Другая ветвь поворачивает на северо-восток, давая начало Наваринскому течению, которое огибает мористую часть Анадырского залива, образуя в нем циклонический круговорот, и осуществляет перенос вод в северную часть моря - в Берингов пролив и зал. Нортон. Скорость непериодических течений в Анадырском заливе изменяется от 5 до 22 см/с, в прол. Шпанберга она составляет 5-10 см/с, а в прол. Чирикова может достигать 50 см/с. На востоке моря, в средней части берингоморского шельфа и в центральной части глубоководной котловины скорости постоянных течений относительно невелики (2-6 см/с). В периферийных районах этих областей, на материковом склоне и у подводных возвышенностей они несколько возрастают (до 10-15 см/с). Максимальные значения скорости этих течений наблюдаются в узкостях проливов, у камчатского и корякского побережий (до 25-50 см/с). По имеющимся данным при определенных синоптических ситуациях скорость непериодических течений в отдельных районах может достигать 80 см/с.

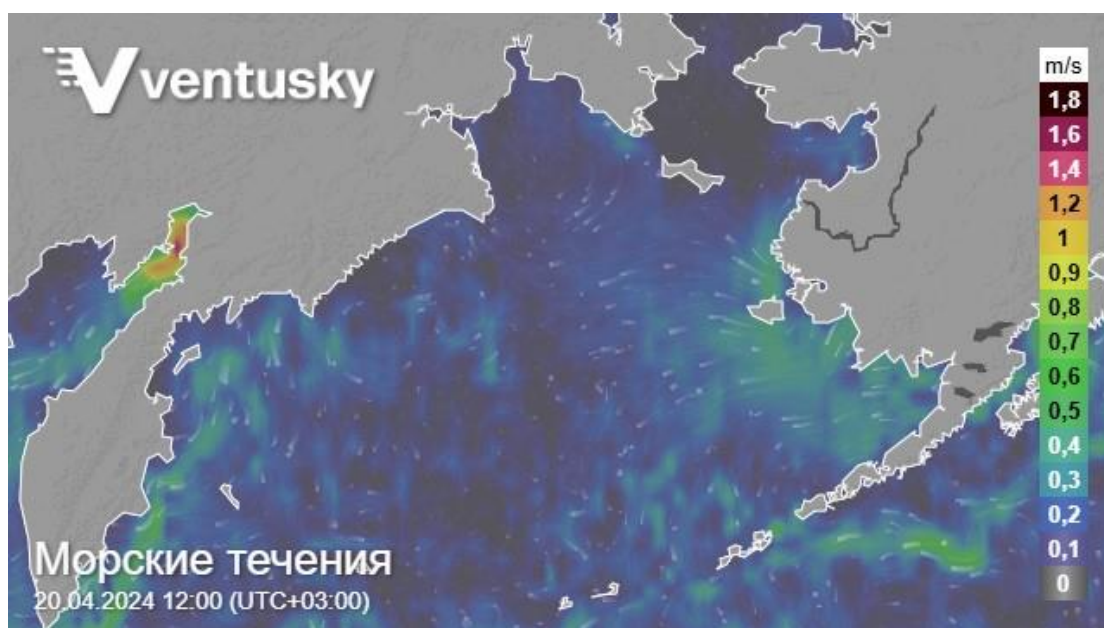


Рисунок 2.23 – Скорость течения в Беринговом море (м/с) 20.04.2024

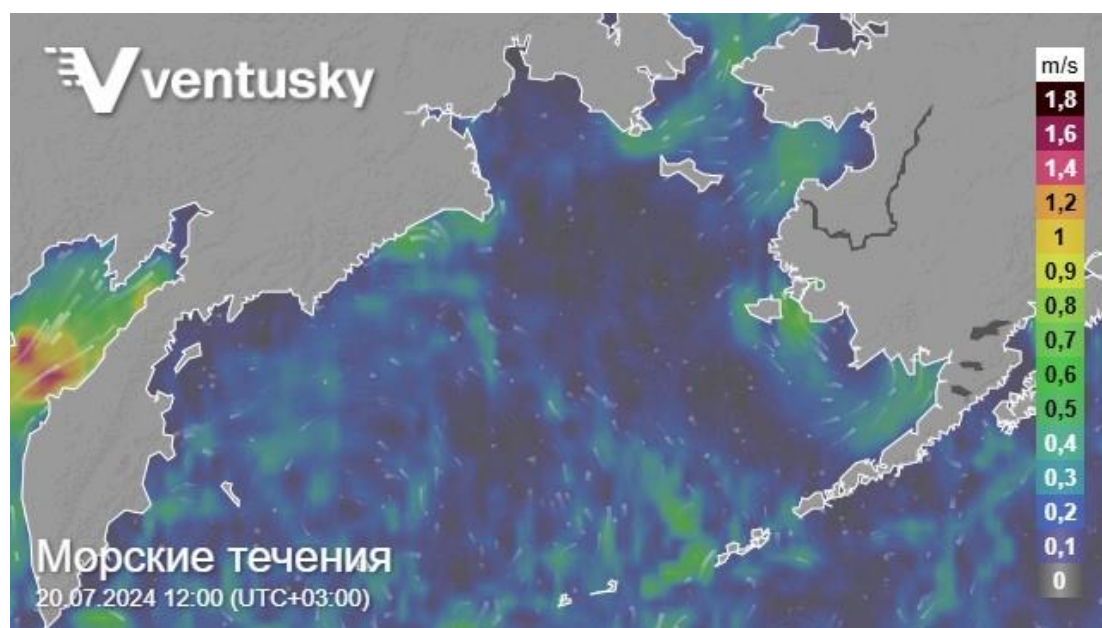


Рисунок 2.24 – Скорость течения в Беринговом море (м/с) 20.07.2024

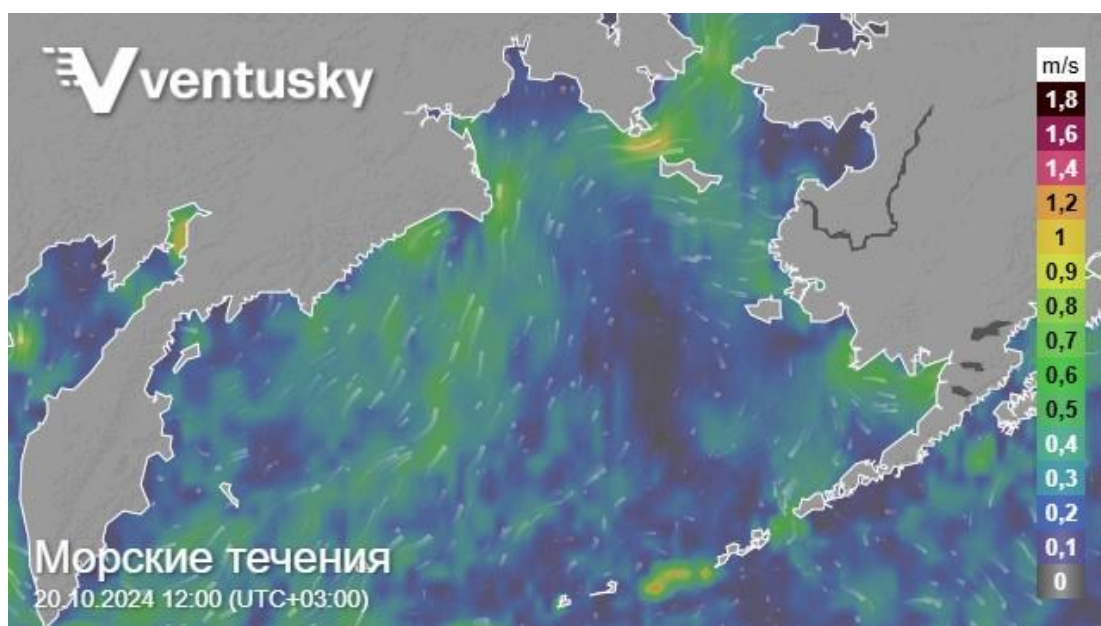


Рисунок 2.25 – Скорость течения в Беринговом море (м/с) 20.10.2024

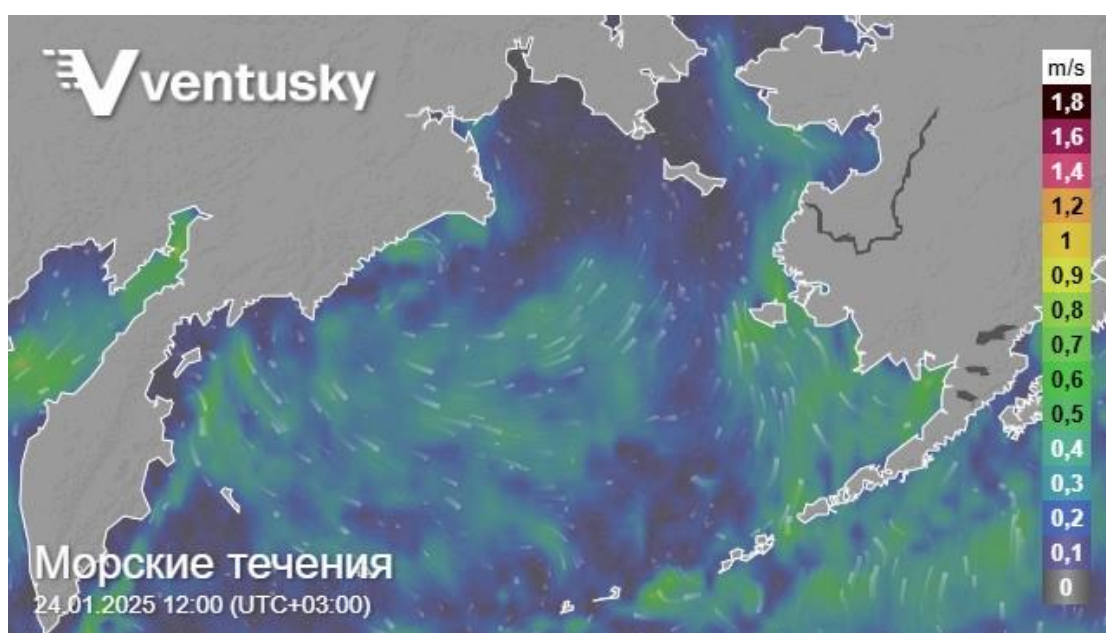


Рисунок 2.26 – Скорость течения в Беринговом море (м/с) 20.01.2025

Основные черты годовой изменчивости постоянных поверхностных течений определяются крупномасштабными особенностями атмосферной циркуляции в различные сезоны, приводящими к изменениям ветрового режима над акваторией. Общий циклонический характер движения вод в пределах глубоководной котловины моря сохраняется большую часть года, а максимальные значения скорости течений в отдельных ветвях циркуляции

наблюдаются осенью и зимой. В районе восточно-беринговоморского шельфа наблюдается существенная перестройка поля течений от лета к зиме. В связи с преобладанием ветров северных румбов осенью и зимой вынос вод из Берингова моря в Тихий океан в юго-западной части Командоро-Алеутской гряды в это время заметно увеличивается. Приведенные схемы построены по среднемноголетним данным и характеризуют фоновые особенности поля течений. Фактические значения скорости течений непрерывно изменяются и могут возрасти в поверхностном слое в 4-5 раз под влиянием локальных барических атмосферных возмущений. Общий циклонический характер движения вод в глубоководной котловине сохраняется до горизонта 2000 м. Здесь на глубине 100 м скорости постоянных течений не превышают 5 см/с (до 10 см/с на периферии). В нижележащих слоях в отдельных районах моря на фоне значений 2-7 см/с отмечаются скорости до 10-15 см/с.

К более мелким по масштабу, но важным в гидрологическом отношении особенностям динамики вод Берингова моря принадлежат вихревые образования и меандры течений. Вихревые образования отчетливо заметны на спутниковых изображениях, где они проявляются в виде локализованных аномалий высот уровенной поверхности или поля температуры. Вихри с горизонтальными масштабами 10-200 км и скоростью вращения 20-30 см/с (более 40 см/с в Камчатском течении) обычно наблюдаются на участках акватории с глубинами более 150 м и могут существовать длительное время, внося возмущения в общую картину движения вод.

Заметный вклад в колебания скорости и направления течений Берингова моря вносят реверсивные приливо-отливные течения. Эти течения относительно слабы в открытой части моря, где они носят вращательный характер, однако в проливах, вблизи островов, у материкового побережья и отмелей их скорости составляют 1-2 м/с, а в отдельных мелководных проливах – достигают 4-6 м/с.

Приливные явления в основном обуславливаются особенностями распространения в Беринговом море приливной волны из Тихого океана. Они вызывают значительные колебания уровня моря, скорости и направления

течений. По характеру колебаний уровня здесь проявляются все типы приливов: полусуточные, неправильные полусуточные, неправильные суточные и суточные. На большей части акватории преобладают неправильные суточные приливы. Наименьшие суммарные величины колебаний уровня наблюдаются на севере, в районе Берингова пролива (до 0,5 м), а наибольшие – в Бристольском заливе (более 8 м). В других районах у материкового побережья и островов наибольшая величина прилива не превышает 1,5-2 м [2].

Морские течения могут измеряться не напрямую через данные о плотности, и напрямую – с помощью измерителей течения. В непрямом методе плотность воды вычисляется на основе наблюдений за соленостью и температурой, после чего давление вычисляется на основе плотности. Полученные максимумы и минимумы океанического давления могут быть использованы для определения течений. Непрямой метод устанавливает течения относительно определенной поверхности давления, он лучше всего подходит для крупномасштабных низкочастотных течений.

Прямое измерение течений используется для установления абсолютных течений и отслеживания различных резких изменений. Для правильного измерения, измеритель течений должен достоверно записывать скорость и направление потока, а платформа или причал должны быть надежными, легко разворачиваемыми и чрезвычайно прочными. Исследователи имеют возможность проводить непрерывные измерения течений на уровнях ниже поверхностного слоя на протяжении промежутков времени более года.

Типичная система прямого измерения океанических течений имеет 3 принципиальных компонента: поверхностный или около-поверхностный поплавки; линия, состоящая из сегментов проволоки и нейлона, которая удерживает измерители течений; спусковой механизм, который после отправки акустического сигнала бросает якорь, когда система будет готова к возвращению. Измеритель течений, обычно, использует ротор, оснащенный небольшой направляющей лопастью, которая свободно перемещается в соответствии с измерителем.

Одним из важнейших достижений в современном приборостроении было внедрение маломощной, твердотельной микроэлектроники. Точность векторного усредняющего измерителя тока (VASM), например, была значительно улучшена за счет использования интегральных схем, как и его способность обработки данных. Благодаря последнему VASM может замерять направление и скорость течений примерно восемь раз за каждый оборот ротора. Затем он вычисляет северную и восточную составляющие скорости и сохраняет эти данные вместе с измерениями направления и времени на компакт-кассете. VASM способен выполнять точные измерения в волновых полях, а также с якорных стоянок на поверхности океана благодаря своей функции прямого векторного усреднения.



Рисунок 2.27 – Векторный усредняющий измеритель тока (VASM) трансмиссометром Sea Tech, установленным горизонтально в защитном кронштейне [31]



Рисунок 2.28 – Векторный измеритель тока (VMCM) разворачивается как часть подводной швартовки

Течения могут быть также измерены помощью дрейфующих поплавков, как на поверхности, так и на заданной глубине. Отслеживание местоположения поплавков имеет решающее значение. Поплавки на поверхности можно отслеживать с помощью спутника, но подповерхностные дрейферы необходимо отслеживать акустически. Дрейфер такого типа действует как акустический источник и передает сигналы, которые может отслеживать судно с гидрофонами, подвешенными в море. Для такого отслеживания низкая звуковая частота имеет решающее значение, поскольку чем выше частота звука, тем быстрее его энергия поглощается морем. Самые дальнобойные поплавки, доступные в середине 1980-х годов, работали на частоте всего около 250 герц. Дальнобойные поплавки обычно дрейфуют по каналам, известным как каналы звукофиксации и ранжирования (SOFAR), которые встречаются в различных районах океана, где определенное сочетание условий температуры и давления влияет на скорость звука. В некотором смысле канал SOFAR действует как тип акустического волновода, который фокусирует звук; в результате несколько ватт звука могут быть обнаружены на расстоянии до 2000 километров или около того.

Измерение вертикальной скорости в океане представляло собой серьезную проблему в течение многих лет из-за сложности разработки платформы, которая не движется вертикально.

В 1960-х годах океанографы наконец нашли решение: они использовали поплавков с нейтральной плавучестью для измерения вертикальных скоростей. Эта форма измерителя вертикальных течений состоит из цилиндрического поплавка, на котором под углом установлены плавники. Когда вода проходит мимо поплавка, она заставляет поплавок поворачиваться вокруг своей оси. Измерение вращения относительно компаса дает величину вертикального движения воды.

Продолжением нейтрально плавучего поплавка является самоходный, управляемый поплавок. Одна из таких систем, называемая Самоходным подводным исследовательским аппаратом (SPURV), маневрирует под поверхностью моря в ответ на акустические сигналы с исследовательского судна. Его можно использовать для получения как горизонтальных, так и вертикальных профилей различных физических свойств.

Система доплеровского сонара для измерения скорости течения в верхних слоях океана передает узкий луч, который рассеивается дрейфующим планктоном и другими организмами в самых верхних слоях океана. Из доплеровского смещения отраженного звука можно определить компонент скорости воды, параллельный лучу, на расстоянии 1400 метров от передатчика с точностью до одного сантиметра за 0,1 секунды.

Неотъемлемой частью полной картины океана является профиль скорости. Были разработаны различные методы измерения течений, зависящих от глубины или горизонтального положения и изменяющихся в зависимости от них. Для проведения таких измерений были разработаны три метода. Первый включает акустическое отслеживание «тонущего поплавка», когда он опускается к морскому дну. Второй метод подразумевает использование устройства свободного падения, оснащенного датчиком течения. Третий включает класс измерителей течения, специально разработанных для перемещения вверх и вниз

по фиксированной линии, прикрепленной к судну, швартовке или дрейфующему бую. Один из таких приборов имеет роликовый блок, который соединяет переднюю часть прибора с проводом от судна. Таким образом, движение судна отделяется от движения прибора. Другим важным компонентом этого прибора является его корпус, конструкция, которая не только обеспечивает плавучесть, но и служит в качестве направляющего флюгера. В нижней части корпуса находится устройство, которое регистрирует скорость, температуру и глубину. Вся система опускается со скоростью около 10 сантиметров в секунду, что обеспечивает вертикальное разрешение в несколько метров для получаемого профиля скорости [32].

Таким образом, были рассмотрены особенности рельефа, климатические особенности, сезонная изменчивость течений Берингова моря.

Важность этого региона для мировой экономики обусловлена наличием крупных месторождений нефти и газа, а также возможностью перевозки различных видов грузов, включая контейнеры, сыпучие грузы и сжиженный природный газ.

Для России экономическая значимость заключается не только в наличии значительных запасов природных ресурсов, но и возможностью развития Северного морского пути. Маршрут через Берингово море и Берингов пролив позволяет существенно сократить время доставки грузов между портами Дальнего Востока и европейской частью России, а также снизить затраты на их транспортировку.

Причиной выбора Берингова моря для создания модели является тот факт, что оно имеет для России крупное транспортное значение, как звено Северного морского пути, местом добычи ресурсов, а также политически важной акваторией между Россией и США.

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

3.1. Сбор данных

От рельефа дна моря зависят многие природные факторы, он влияет на циркуляцию вод, течения и на динамику вод в целом. Данные о рельефе дна необходимы во многих сферах деятельности человека. От этих данных зависят хозяйственная и промышленная деятельность, навигация, добывающая промышленность.

Технологии ГИС помогают получить и исследовать данные о рельефе, и один из видов представления таких данных – цифровые модели.

Для создания модели дна необходимы данные о глубинах и рельефе выбранной акватории. Задача усложнена тем, что, в отличие от рельефа суши, рельеф дна скрыт под толщей воды, из-за чего большая часть инструментов, позволяющих получать спутниковые снимки, оказываются бесполезны.

Для получения данных был использован ресурс «British Oceanographic Data Centre (BODC)». BODC является частью Национального океанографического центра Великобритании и предназначен для обмена и сохранения данных о Мировом океане.

BODC предоставляет открытый доступ к различным инструментам, в том числе к общей батиметрической карте океанов «General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)». Данный интернет ресурс позволяет получить батиметрические карты как полярных регионов (polar grids), так и остального мира в целом (global grid). Помимо этого, есть инструмент, позволяющий получить данные об области, выбранной пользователем.

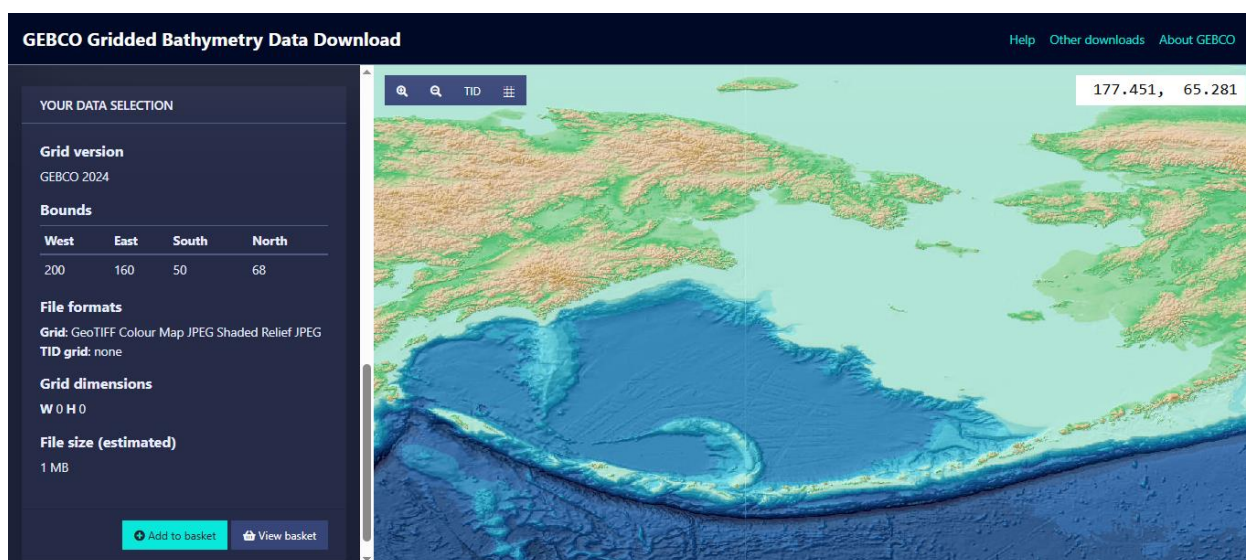


Рисунок 3.1 – Инструмент GEBCO Download

После регистрации были выбраны координаты области Берингова моря.

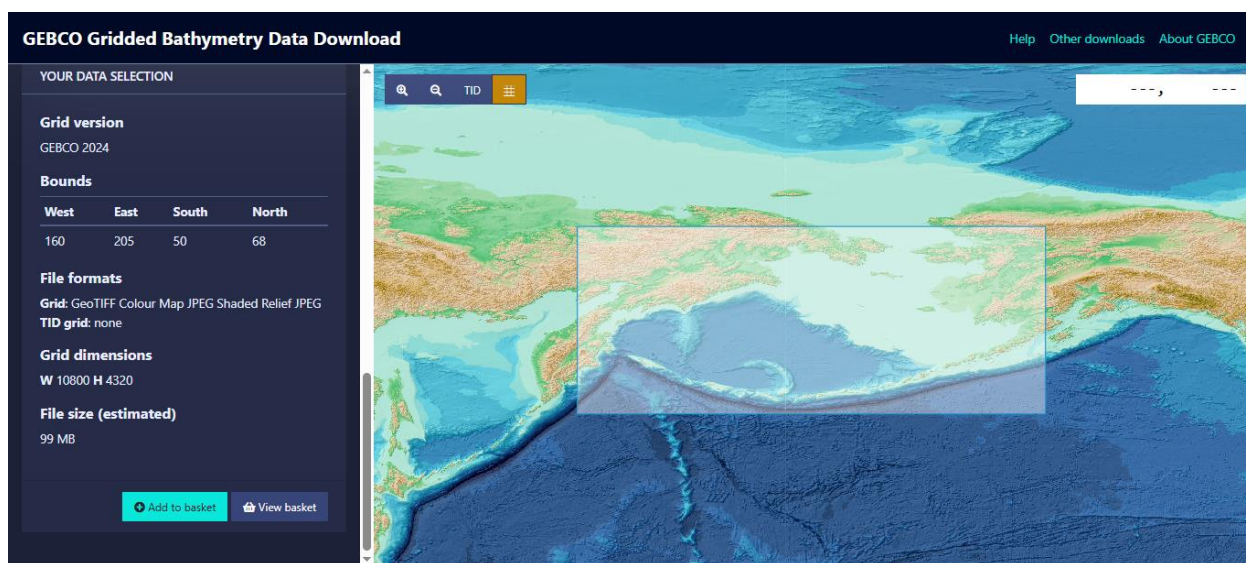


Рисунок 3.2 – Выбор области

Выбранная область добавляется в «Корзину», и после выбора «Download your data» персонализированная ссылка на скачивание данных приходит на почту, указанную при регистрации. Ссылка остается активной в течение двух дней.

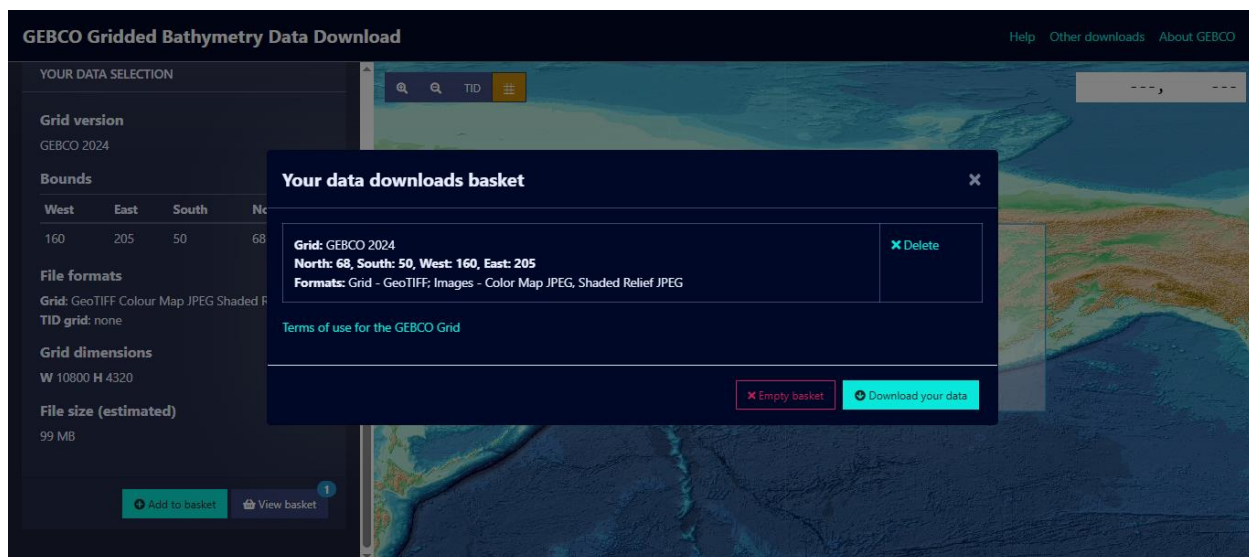


Рисунок 3.3 – Data downloads basket

3.2. Подготовка данных

Для работы использовалась программа QGIS 3.40.4. В проект был добавлен скачанный файл TIFF с данными рельефа.

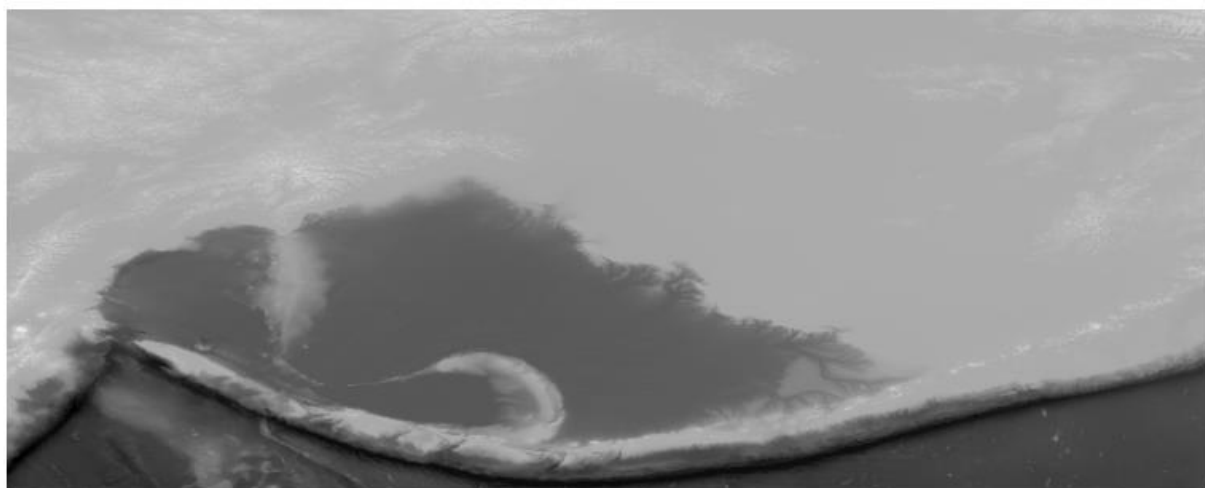


Рисунок 3.4 – Окно проекта после загрузки gebco_2024_n68.0_s50.0_w160.0_e205.0

Черно-белое изображение – малоинформативно, поэтому необходимо изменить стиль слоя и подобрать подходящий градиент.

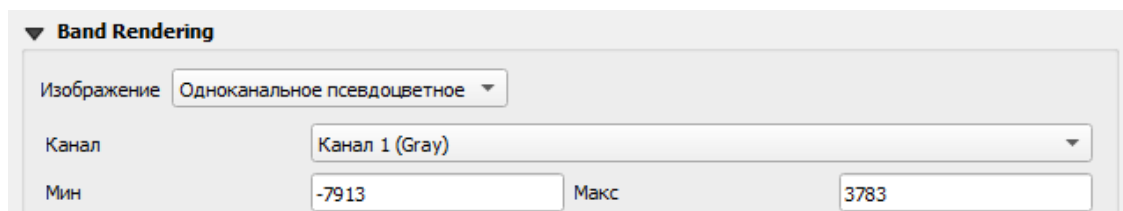


Рисунок 3.5 – Свойства слоя

Изображение изменено на одноканальное псевдоцветное. Минимальное значение -7913, максимальное 3783.

Вычисленная глубина, превышающая 7000 м, скорее всего, вызвана тем, что в установленном растре присутствует не только акватория Берингова моря, но также задета область Тихого океана за Алеутскими островами, а именно, Алеутский желоб.

3.3. Построение модели дна акватории Берингова моря

Для дальнейшей работы была выбрана система координат WGS 84 (EPSG:4326).

Помимо того, что в модели присутствуют участки суши, распределение глубин тоже не равномерно, нужно отобразить не только особенности рельефа южной части, но и обширную шельфовую зону. Автоматическое определение интервалов градиента, в данном случае, не отобразит рельеф должным образом, поэтому интервалы вводились вручную.

На рисунке 3.6 приведено сравнение автоматической и ручной классификации, можно увидеть, насколько увеличилась детализация изображения. В глубоководной зоне проявилось постепенное увеличение глубины, в то время как при автоматической классификации дно казалось однородным.

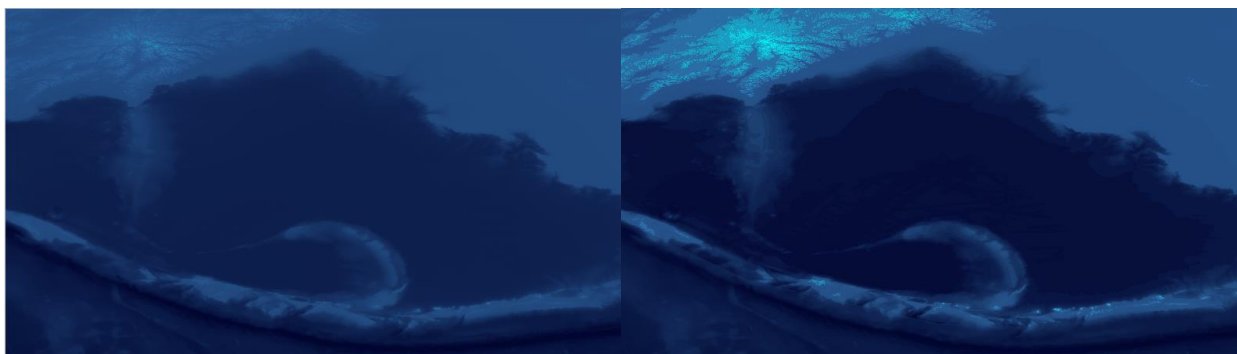


Рисунок 3.6 – Пример, сравнение автоматической классификации (слева) и классификации вручную (справа)

Для создания точного градиента, был использован инструмент для создания профилей высот, что поможет в определении наиболее важных точек глубины, которые нужно отобразить.

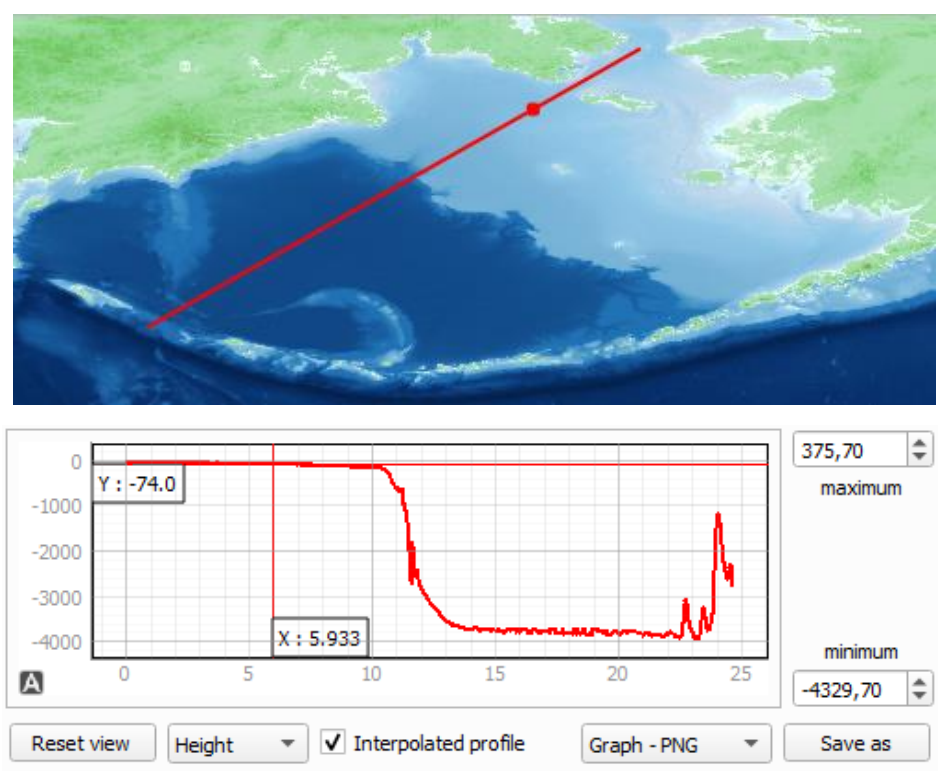


Рисунок 3.7 – Профиль дна №1

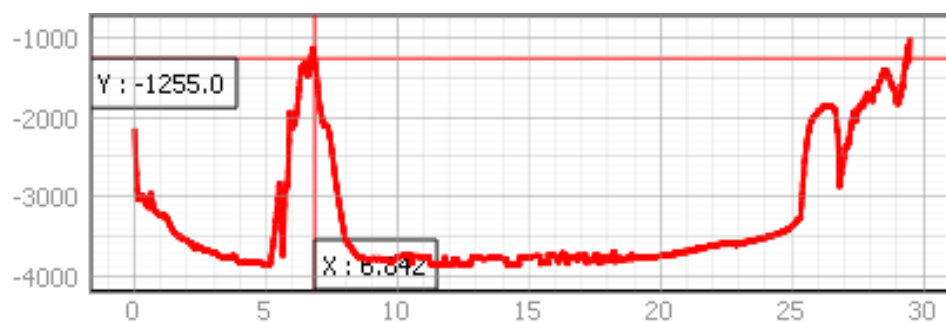


Рисунок 3.8 – Профиль дна №2

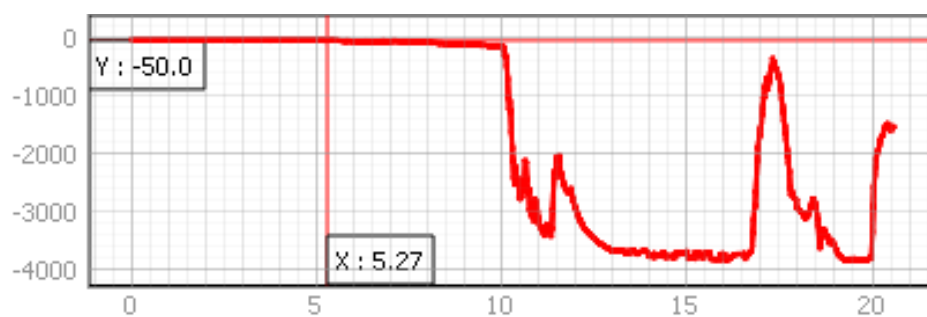


Рисунок 3.9 – Профиль дна №3

Исходя из рисунков 3.7-3.9, выяснилось, что в пределах выбранной акватории, глубина в зоне шельфа варьируется в пределах от 0 до -100 метров.

В южной, более глубокой, части моря, в зоне Командорской и Алеутской котловин, максимальная глубина достигает, приблизительно, -4000 м.

Поскольку южной границей Берингова моря являются Алеутские острова, а ранее упомянутый Алеутский желоб находится южнее их, т.е. за пределами моря, было принято решение вырезать этот участок растра. Это также было сделано по причине, что его максимальная глубина сильно превышает максимальную глубину моря, что влечет за собой уменьшение точности и детализированности нужного участка дна.

Была создана «маска» с помощью функции «Shapefile», как показано на рисунке 3.10. После этого, растровый слой был обрезан по сделанной маске. Результат показан на рисунке 3.11.



Рисунок 3.10 – Создание маски

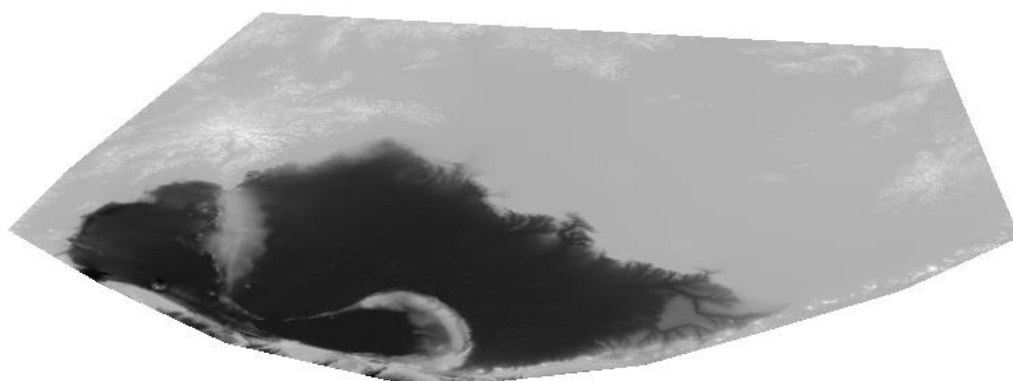


Рисунок 3.11 – Обрезанный растр

Далее был настроен градиент, с учетом данных профилей дна, где 0 – граница между сушей и морем.

На рисунке 3.12 изображена созданная итоговая карта глубин, где модель представлена в двухмерном формате.

На карте видно, что:

- территория суши отображена градиентом из оттенков зеленого на высоте от 0 до 1000 метров, и в оттенках коричневого на высотах от 500 до 1500 метров;
- море отображено градиентом из оттенков синего.

Помимо этого, на карту была добавлена стрелка севера

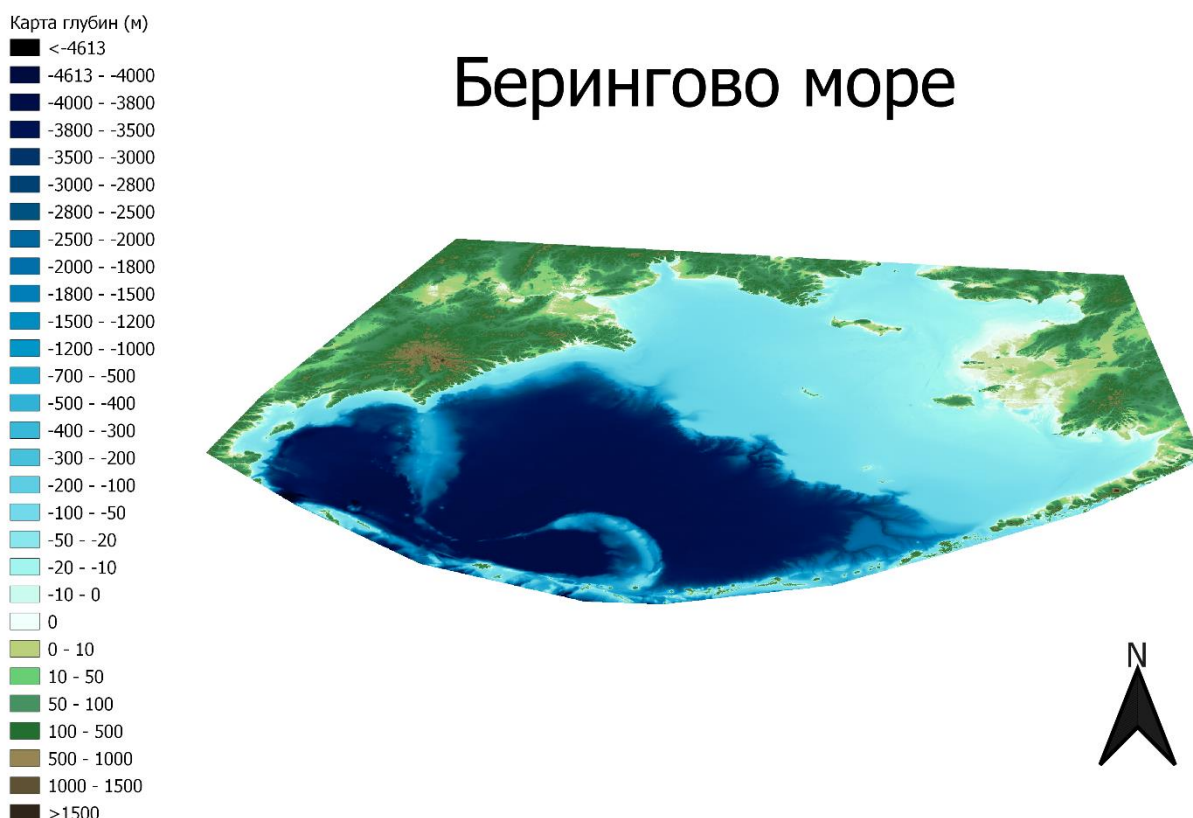


Рисунок 3.12 – Итоговая карта глубин

Был использован инструмент 3D отображения «QGIS2Three.js». Были выполнены настройки, максимально приближающие модель к реальным размерам объекта. Для улучшения отображения модели был добавлен контур.

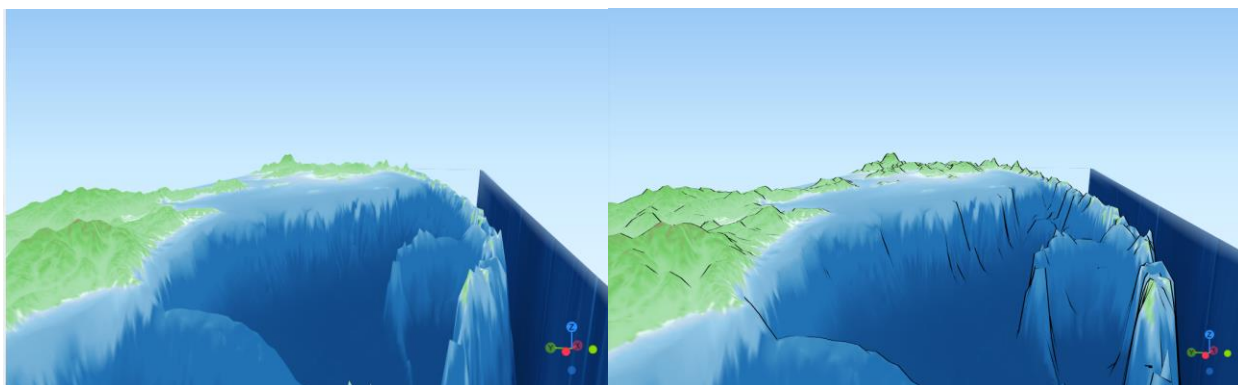


Рисунок 3.13 – Результат применения OutlineEffect, до и после

Получившаяся модель представлена на рисунках 3.14-3.16.

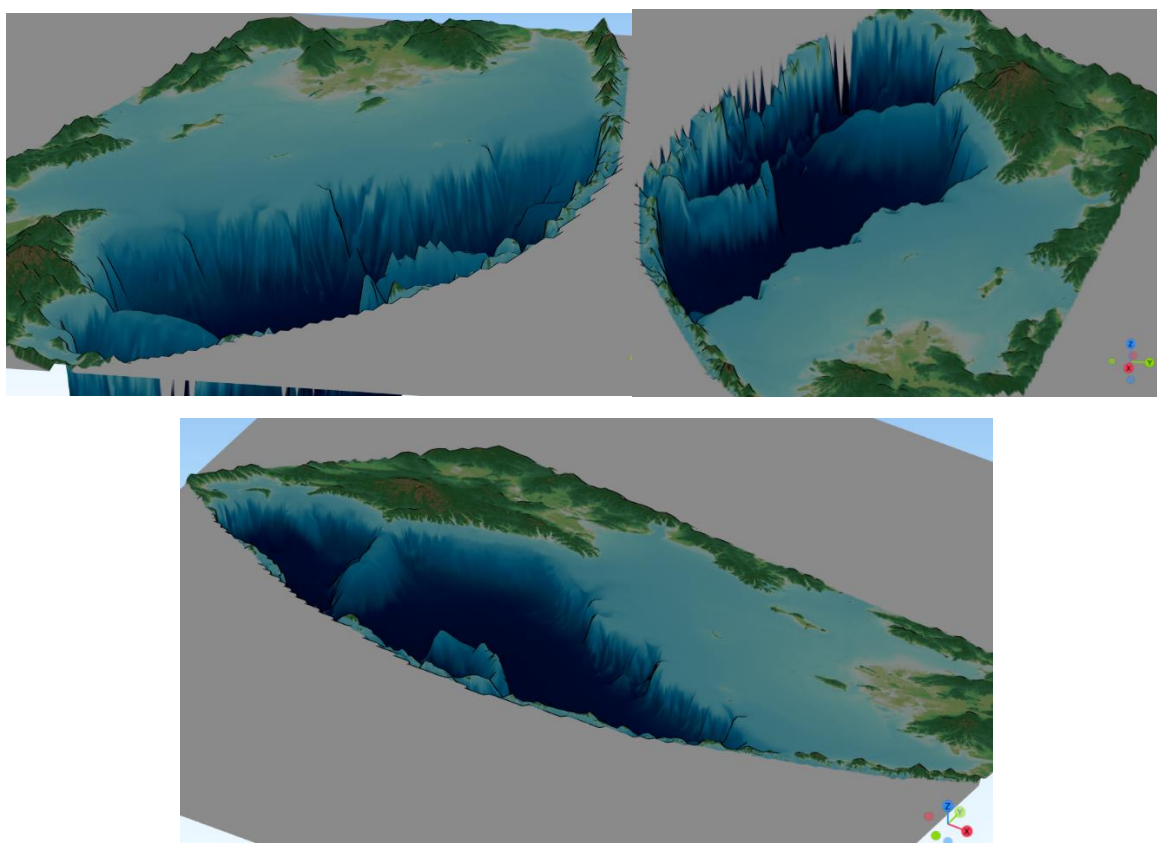


Рисунок 3.14-3.16 – Модель в среде «QGIS2Three.js»

Для лучшей демонстрации модели был использован инструмент просмотра трехмерной компьютерной графики 3D-Viewer (Microsoft), который обеспечивает более расширенные настройки демонстрации, что делает модель более приятной глазу.

Итоговая модель представлена на рисунках 3.17-3.20.

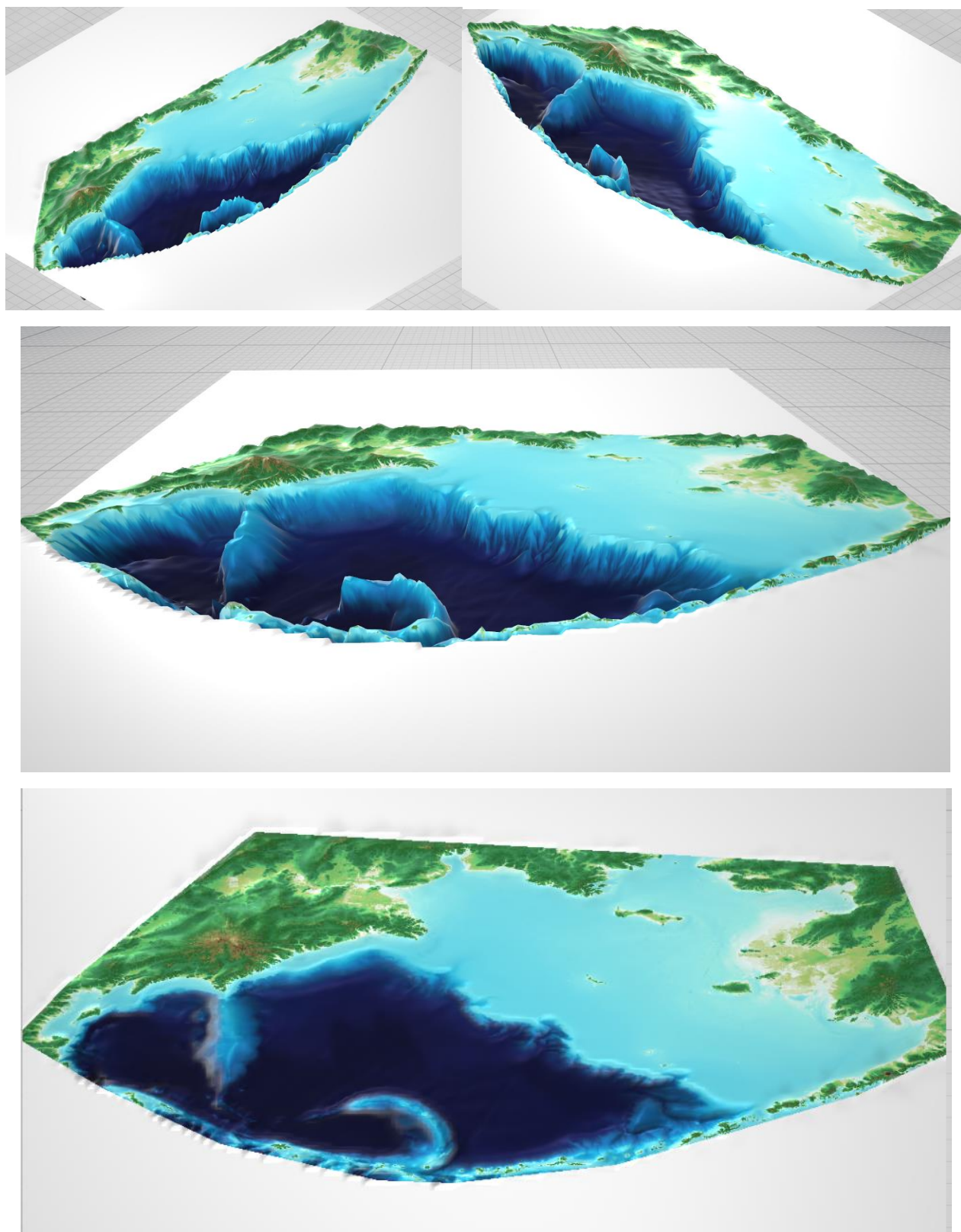


Рисунок 3.17-3.20 – Итоговая модель

3.4. Практические рекомендации

Одним из главных применений полученной модели является визуализация и демонстрация рельефа. Демонстрация может быть осуществлена как в среде QGIS, в которой она была создана, так и различными инструментами просмотра 3D объектов. Помимо объемной модели, данную ЦМР можно использовать как двухмерную батиметрическую карту.

Данная ЦМР содержит данные о высотах выбранной акватории и несет в себе информацию о рельефе. С помощью применения ГИС, модель позволяет создавать гистограммы, профили дна, анализировать углы наклона поверхности и, в целом, производить батиметрический анализ.

Созданная модель наглядно отображает все элементы рельефа дна. Можно увидеть, что обширная шельфовая зона занимает почти половину всей площади моря на северо-востоке. В глубоководной юго-западной части можно увидеть Командорскую и Алеутскую котловины, а также поднятия в виде хребтов Ширшова и Бауэрс.

Видно, что глубина северной и восточной частей моря, в основном, не превышает 200 метров, а в юго-западной достигает более 3000 метров.

Если использовать возможности ГИС, такие объекты как хребты есть возможность рассмотреть подробнее, например, с помощью ранее упомянутого инструмента для извлечения профилей «Profile Tool».

На рисунках 4.1, 4.2 показаны продольные и поперечные профили хребтов Ширшова и Бауэрс.

Максимальная точка хребта Ширшова находится на отметке глубины чуть более 500 метров на севере, около 900 метров в середине, и уменьшается на глубину более 2000 метров к югу. Поперечное сечение имеет форму относительно симметричной дуги.

Для оценки хребта Бауэрс была проведена кривая по его гребню. Самая высокая точка находится на глубине чуть более 80 метров, основная часть

колеблется от 100 до 1600 метров, после чего уходит на глубину более 3500 метров.

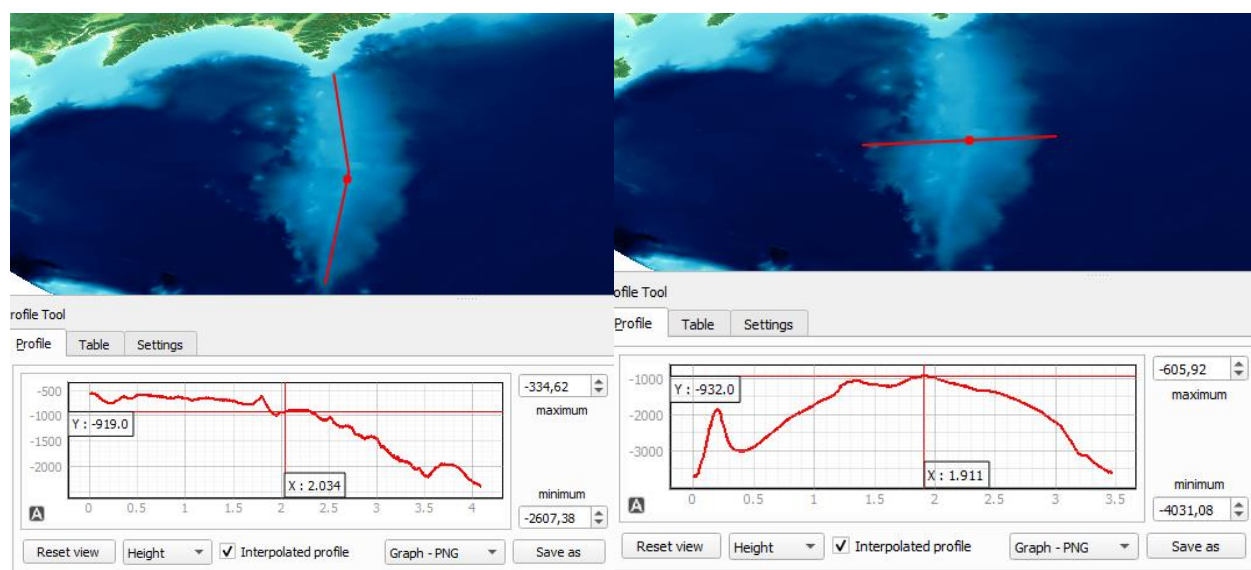


Рисунок 3.21-3.22. – Профили хребта Ширшова

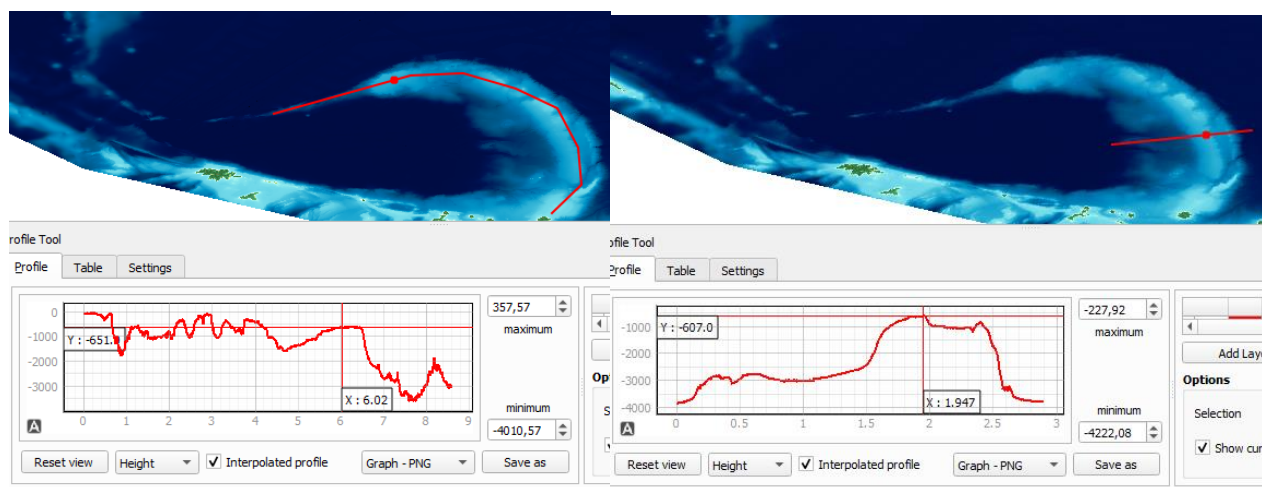


Рисунок 3.23-3.24. – Профили хребта Бауэрс

Полученная модель может быть использована как для получения ряда характеристик дна Берингова моря, так и для различного рода исследований. Подобная модель универсальна и для других акваторий, при наличии данных о точках глубин, есть возможность построения ЦМР любого другого моря, в том числе морей Северного морского пути, которые являются важными областями

интереса как с точки зрения исследований, промышленности и добычи ресурсов, так и с геополитической.

Данная ЦМР позволяет:

- создавать подробные карты рельефа;
- проводить анализ рельефа и определять его морфометрические характеристики с помощью ГИС, например, с помощью построения профилей дна, создания гистограмм и т.д.;
- проводить моделирование течений, создание геоакустических моделей, моделирование сейсмических явлений, выполнение расчетов и т.д.

Таким образом, была создана и оформлена цифровая модель рельефа дна Берингова моря, был описан принцип работы полученной модели, проведен анализ данных и рассмотрены способы ее применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геоинформационная система — это технология, которая позволяет организовывать, анализировать и визуализировать географическую информацию. К одной из многих областей применения ГИС относится изучение рельефа.

Геоинформационные системы позволяют делать модели, от которых зависит выполнение задач, необходимых для оптимизации и обеспечения безопасности человеческой деятельности. Одной из таких задач является создание подробных карт рельефа.

Геоинформационная модель рельефа дна акватории Берингова моря, разработанная в ходе выполнения магистерской диссертации, предназначена для использования организациями, связанными с морской навигацией и океанологическими исследованиями. Техничко-экономическая эффективность будет обеспечиваться за счет наглядности модели рельефа, и возможности анализа и моделирования различных природных и антропогенных явлений, что позволит принимать взвешенные решения по навигации, проектированию и обеспечению безопасности среды и человека.

Подобные модели акваторий морей Северного ледовитого океана оказывают положительное влияние на развитие Северного морского пути, добычу полезных ископаемых и совершенствование методов морской навигации.

Для разработки модели была выбрана геоинформационная система QGIS. QGIS является системой для создания, редактирования, визуализации и анализа пространственной информации. Данная ГИС является одной из самых доступных на рынке и, сравнительно, простой в использовании. QGIS содержит инструменты для работы с космическими снимками и прочими географическими данными. Возможна интеграция с другими ГИС, а также с продуктами Microsoft, такими как 3D-viewer, что дает больше возможностей для редактирования модели.

Таким образом, простота использования, доступность и разнообразие инструментов для создания геоинформационных моделей, являются основными причинами выбора системы QGIS для решения задачи создания модели рельефа акватории Берингова моря.

В ходе выполнения магистерской диссертации были выполнены следующие задачи:

- Изучены способы применения ГИС в морях Северного морского пути;
- Изучена акватория Берингова моря, ее физико-географические особенности;
- Создана модель акватории Берингова моря.

Таким образом, цель работы, заключающаяся в создании геоинформационной модели акватории Берингова моря, была достигнута.

Результаты работы были представлены на конференции, что подтверждается публикацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М., Изд-во МГУ, 1982 г. С ил., 192 с. 146 страниц
2. Берингово море / ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ / Гидролого-гидрохимические характеристики и гидрометеорологические условия акватории [Электронный ресурс]: ЕСИМО – URL: <http://portal.esimo.ferhri.ru/portal/portal/poi/bering>
3. Берега / П. А. Каплин, О. К. Леонтьев, С. А. Лукьянова, Л. Г. Никифоров. — Москва : Мысль, 1991. — 479 с.
4. Залогин, Борис Семенович. Моря / Б. С. Залогин, А. Н. Косарев. — Москва : Мысль, 1999. — 399, [1] с. : ил., карт. : 26 см — (Природа мира).
5. Brubaker D.R. The Russian Arctic Straits. Leiden; Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 2005. P. 192–193.
6. Kraska J., Pedrozo R. International Maritime Security. Leiden; Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 2013. P. 33.
7. Lopez Martin A.G. International Straits. Concept, Classification and Rules of Passage. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. P. 197.
8. Метод и технология краткосрочного прогноза изменений уровня моря в юго-западной части Берингова моря/ Ю.В Любицкий, С.О. Романский
9. Абузьяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 287 с.
10. Ашик И.М. Численный гидродинамический метод прогноза колебаний уровня в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского моря // Результаты испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических прогнозов. 2005. Информационный сборник № 31. С. 85-103.
11. Любицкий Ю.В. Численное моделирование приливов Берингова моря // Материалы докладов XII Всероссийского симпозиума «Физика геосфер», 6-10 сентября 2021 г., Владивосток. 2021. С. 239-241.

12. Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction // Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 2004. 58 p.
13. Peter J. Davies, Aleksandr Petrovich Lisitsin, Konstantin Trifonovich Bogdanov / Bering Sea and Strait [Электронный ресурс]: Britannica – URL: <https://www.britannica.com/place/Bering-Sea>
14. MODIS and VIIRS Snow and Ice Global Mapping Project / Sea Ice [Электронный ресурс]: NASA – URL: <https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/?c=sea>
15. Прошлое и будущее Северного морского пути [Электронный ресурс]: ТАСС СПЕЦПРОЕКТЫ – URL: <https://icebreakers.tass.ru/dolgij-put-na-sever/ot-ermaka-do-sovremennyh-atomohodov>
16. How Do GPS Systems Aid Maritime Navigation [Электронный ресурс]: Maersk training – URL: <https://maersktraining.com/news-and-insights/industry-insights-blog/how-do-gps-systems-aid-maritime-navigation>
17. Каковы возможности использования ГЛОНАСС в морском транспорте [Электронный ресурс]: МСС ГЛОНАСС – URL: <https://mssglonass.ru/articles/kakovy-i-vozmozhnosti-ispolzovaniya-glonass-v-morskom-transporte/?ysclid=mai0njpxar163349909>
18. Understanding Satellite Navigation Systems: GPS and Beyond [Электронный ресурс]: FlyPix – <https://flypix.ai/blog/satellite-navigation-systems/>
19. The Role of Satellite Technology in Vessel Tracking [Электронный ресурс]: Sinay – https://sinay.ai/en/the-role-of-satellite-technology-in-vessel-tracking/#elementor-toc__heading-anchor-0
20. Ледовый навигатор за три года: «Новый космос» и частные решения для СМП [Электронный ресурс]: Arctic Russia – <https://arctic-russia.ru/article/ledovyy-navigator-za-tri-goda-novyy-kosmos-i-chastnye-resheniya-dlya-smp/>
21. «Ледовый навигатор» СМП [Электронный ресурс]: Транспорт России – <https://transportrussia.ru/razdely/it-tekhnologii/9618-ledovyy-navigator-smp.html>
22. Мониторинг ледовой обстановки [Электронный ресурс]: ИННОТЕР – <https://innoter.com/services/monitoring/monitoring-ledovoy-obstanovki/>

23. Спутниковое микроволновое зондирование морского льда в Арктике [Электронный ресурс]: Solab.rshu – https://solab.rshu.ru/wp-content/uploads/2022/02/Lecture_Zabolotskikh_251120_compressed.pdf
24. Landsat Science [Электронный ресурс]: NASA – <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>
25. Satellite Missions [Электронный ресурс]: eoPortal – <https://www.eoportal.org/satellite-missions/icesat>
26. Методика составления ледовых карт ААНИИ [Электронный ресурс]: Российская Арктика – <https://russian-arctic.info/info/articles/oceanology/metodika-sostavleniya-ledovykh-kart-aanii/?ysclid=majnebbqku584481074>
27. Обзорные ледовые карты СЛО [Электронный ресурс]: ААНИИ – <https://www.aari.ru/data/realtime/ledovye-karty-2/slo2024>
28. How do we map the seafloor [Электронный ресурс]: NIWA – <https://niwa.co.nz/oceans/how-do-we-map-seafloor>
29. Ocean Exploration [Электронный ресурс]: NOAA – <https://oceanexplorer.noaa.gov>
30. Берингово море [Электронный ресурс]: Npacific – <http://www.npacific.ru/np/library/encicl/2/0020.htm>
31. Documentation of the U.S. Geological Survey Oceanographic Time-Series Measurement Database [Электронный ресурс]: USGS – <https://woodshole.er.usgs.gov/pubs/of2007-1194/html/velocity.html>
32. Undersea exploration / Methodology and instrumentation [Электронный ресурс]: Britannica – <https://www.britannica.com/technology/undersea-exploration/Water-sampling-for-chemical-constituents>
33. Ледовая обстановка [Электронный ресурс]: НИЦ «ПЛАНЕТА» – http://planet.rssi.ru/index.php?lang=ru&page_type=news&page=news&news_item=ice_bering_2024_11_14
34. Cavalieri, D., T. Markus, D.K. Hall, A. Ivanoff and E. Glick, 2010: "Assessment of Antarctic winter sea ice concentrations using Aqua MODIS," TGARS, 48(9): 3331-3339.

35. Cavalieri, D., T. Markus, D. Hall, A. Gasiewski, M. Klein, and A. Ivanoff, 2006: "Assessment of EOS Aqua AMSR-E Arctic Sea Ice Concentrations Using Airborne Microwave and Landsat 7 Imagery," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 3057-3069.
36. Comiso, J. C., 2006: Arctic warming signals from satellite observations, Weather, 61(3):70–76, doi:10.1256/wea.222.05.
37. Hall, D.K., J. Key, K.A. Casey, G.A. Riggs and D. J. Cavalieri, 2004: Sea ice surface temperature product from the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(5):1076-1087.
38. Key, J.R. and Collins, J.B., 1997: "High-latitude surface temperature estimates from thermal satellite data," Remote Sensing of Environment, 61:302-309.
39. Key, J. and M. Haeffliger, 1992: "Arctic ice surface temperature retrieval from AVHRR thermal channels," Journal of Geophysical Research, 97:(D5):5885-5893.
40. Lindsey, R. and D. Rothrock, 1993: "The calculation of surface temperature and albedo of Arctic sea ice from AVHRR," Annals of Glaciology, 17:174-183.
41. Pounder, E.R., 1965, Physics of Ice, Pergamon Press, Oxford, England, 151 p.
42. Washington, W.M. and C.L. Parkinson, 1986: An Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling, University Science Books, Mill Valley, CA, 422 p.
43. Weeks, W., 1981: "Sea ice: the potential of remote sensing," Oceanus, 24:39-48.
44. Zwally, H.J., J.C. Comiso, C.L. Parkinson, W.J. Campbell, F.D. Carsey and P. Gloersen, 1983: "Antarctic Sea Ice, 1973-1976: Satellite Passive-Microwave Observations," NASA SP-459, 206 p. GPO., Washington, D.C.
45. WMO №574, Sea-Ice Information Services in the World – Geneva, 2017.
46. Моря советской Арктики. / Визе Ю. В. – М. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1948. – 418 с.
47. Научные исследования в Арктике. / Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Ковалёв Е. Г., Смоляницкий В. М.; Под ред. Фролова И. Е., Карклина В. П. – СПб: Наука, 2007. – Т. 2: Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа– 135 с.

48. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО). / Бушуев А. В., Быченков Ю. Д., Лошилов В. С., Масанов А. Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 120 с.
49. Бушуев А. В., Гаврило В. П., Лебедев Г. А. Информативность различных видов и методов дистанционных ледовых наблюдений // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеиздат, 1997. – С. 345-369.
50. Номенклатура морских льдов, условные обозначения для ледовых карт. – Л.: Гидрометеиздат, 1974.
51. WMO №259, WMO Sea-Ice Nomenclature, – 2017.
52. Исследование распределения и динамики морских льдов по телевизионным снимкам ИСЗ "Метеор". / Бушуев А. В., Быченков Ю. Д. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 132 с.
53. Отчёт о научно-оперативном обеспечении зимнего плавания судов в западном районе Арктики в 1983-1984 гг. – Диксонское УГКС, о. Диксон, 1984.
54. JCOMM Technical Report №23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data, – 2014.
55. Bushuev A. V., Loshchilov V. S. Ice chart composition at AARI // in Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route: Studies and Applications. – Chichester: Springer Praxis, 2007. – p. 243-252.
56. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. Под ред. Смирнова В. Г. – СПб: ААНИИ, 2011. – 240 с.
57. Sea Ice: Physics and Remote Sensing / Shokr M., Sinha N. K. – New Jersey: Wiley, 2015. – 624 p.
58. Соколова Ю. В. Центр приёма спутниковой информации ААНИИ на Шпицбергене // Российские полярные исследования. – 2019. – Т. 1, № 35. – С. 19-20.
59. Бушуев А. В., Парамонов А. И. Общие принципы и методы дешифрирования и интерпретации данных // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеиздат, 1997. – С. 338-345.

60. Бушуев А. В. Комплексное использование информации // Морской лёд / Под ред. Фролова И. Е., Гаврило В. П. – СПб: Гидрометеиздат, 1997. – С. 369-376.
61. Knuth M. A., Ackley S. F. Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates // *Annals of Glaciology*. – 2006. – Vol. 44. – p. 303-309.
62. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, № 21.
63. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2008. – Vol. 113, № C2.
64. Steffen K., Maslanik J. A. Comparison of Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer radiance and derived sea ice concentrations with Landsat imagery for the north water area of Baffin Bay // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1988. – Vol. 93, № C9. – p. 10769-10781.
65. Steffen K., Schweiger A. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 1991. – Vol. 96, № C12. – p. 21971-21987.
66. Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Saldo R., Soerensen A. M. Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data Set Intercomparison: Closed Ice and Ship-Based Observations // *The Cryosphere Discuss.* – 2019. – Vol. 2019. – p. 1-55.
67. Платонова Е. В., Бычкова И. А. Многолетние наблюдения за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковых данных // *Учёные записки РГГМУ*. – 2018. – Т. 53. – С. 103-112.

68. Girard-Ardhuin F., Ezraty R. Enhanced Arctic Sea Ice Drift Estimation Merging Radiometer and Scatterometer Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50, № 7. – p. 2639-2648.
69. <https://www.aari.ru/data/realtime/ledovye-karty-2/slo2024> – Архив генерализированных ледовых карт Северного Ледовитого океана, составленных ААНИИ. – (дата обращения: 10.04.2025).
70. Marine data sharing and preservation, managed & operated by the National Oceanography Centre [Электронный ресурс]: BODC – <https://www.bodc.ac.uk/>
71. Gridded Bathymetry Data [Электронный ресурс]: Gebco – <https://www.gebco.net/>