



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 работа)

На тему: Анализ съемки рельефа дна в акватории Северного Ледовитого
океана

Исполнитель: Яценко Марина Константиновна

Руководитель: кандидат технических наук, Коринец Екатерина Михайловна

«К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой: доктор технических наук, Бурлов Вячеслав
Георгиевич

« ___ » _____ 2025 г.

Санкт–Петербург, 2025

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ.....	6
1.1. История исследований рельефа дна СЛО.....	6
1.2. Физико-географическая характеристика акватории.....	8
1.3. Основные термины	14
1.4. Флора и фауна СЛО	17
1.5. Климатические изменения и их влияние на морфологию дна Северного Ледовитого океана.....	20
1.6. Важность Арктического региона.....	23
1.7. Экологические аспекты и их значение в рельефе СЛО	25
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СЪЕМКИ РЕЛЬЕФА ДНА ...	28
2.1. Системы гидрографической съемки в СЛО	28
2.2. Эхолотная съемка.....	30
2.3. Спутниковая альтиметрия.....	32
2.4. Автономные и телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (АНПА/ТНПА)	35
2.5. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка	38
2.6. Обработка и визуализация данных: программный комплекс QGIS40	
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМКИ РЕЛЬЕФА ДНА. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	62

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире актуальным является вопрос о создании карт рельефа по данным глубин. В акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) активно развивается судоходство, происходит добыча полезных ископаемых, изменяется ледовая обстановка. В связи с этим считается целесообразным создание точных карт рельефа океанического дна. Однако сложные природные условия, такие как низкие температуры, многолетние льды и ограниченная видимость, создают серьезные препятствия для проведения гидрографических исследований.

Современные методы съемки рельефа дна, такие как многолучевая эхолотация, спутниковая альтиметрия и автономные подводные аппараты, позволяют получить достоверные данные, однако огромные площади океанов (в том числе и СЛО), а также трудности физико-географического и экономического характеров затрудняют их широкое применение в арктических широтах. Это делает актуальным развитие альтернативных подходов к получению данных о рельефе дна в районе СЛО.

Целью работы является разработка методики получения данных о рельефе дна, путем обработки батиметрических данных в QGIS.

Объект исследования: акватория Северного Ледовитого океана.

Предмет исследования: рельеф дна акватории Северного Ледовитого океана.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) изучить особенности физико-географического положения СЛО;
- 2) проанализировать современные методы и технологии съемки рельефа дна;
- 3) изучить, получаемые с помощью современных методов, данные о рельефе дна и их точность;

4) изучить геоинформационную систему QGIS и способы автоматизированной обработки данных батиметрической съемки в ней;

5) разработать методику получения данных о рельефе дна.

Новизна исследования заключается в систематизации данных о способах проведения батиметрической съемки, идентификации погрешностей работы методов арктической зоны, обоснование перспектив проведения батиметрических работ. Результаты данных исследований могут быть востребованы в гидрографии, навигационной службе, геологоразведке и экологическим контролем в арктическом регионе.

Научная новизна данного исследования заключается в том, что на сегодняшний день батиметрические данные по СЛО отсутствуют в полном объеме, а те, которые существуют – фрагментарны и временами устаревшие. Методы съемки, которые привычно используют, не обеспечивают достаточной детализацией, а применение современных технологий, таких как многолучевые эхолоты, автономные подводные аппараты, спутниковая альтиметрия, в условиях Арктики может быть связано с рядом нерешенных проблем. К ним относятся:

- 1) влияние ледового покрова на точность измерений;
- 2) недостаточная изученность искажений сигнала в водах с высокой соленостью;
- 3) недоступность северных акваторий для длительных экспедиций.

Практическая значимость работы определяется растущими запросами в промышленности и со стороны государственных структур. Освоение арктического шельфа, включая месторождения полезных ископаемых требует высокоточных батиметрических карт для прокладки трубопроводов, установки платформ и оценки рисков. Развитие Северного морского пути, объем перевозок по которому ежегодно увеличивается, невозможно без актуальных навигационных карт, учитывающих изменения рельефа дна.

Таким образом, актуальность темы диссертации обусловлена:

- Научной потребностью в разработке методов высокоточной съемки дна в экстремальных условиях Арктики.
- Практическими запросами со стороны промышленности, транспорта и экологического мониторинга.
- Технологическими вызовами, связанными с адаптацией современных гидрографических инструментов к арктической среде.

Результаты исследования внесут вклад в развитие методов морской картографии и могут быть использованы при реализации государственных программ освоения Арктической зоны Российской Федерации (РФ), а также в международных проектах по изучению Мирового океана.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. История исследований рельефа дна СЛО

Исследование рельефа дна СЛО началось относительно недавно. Невозможность раннего изучения из-за сложных климатических условий в этом районе, а также из-за наличия массивного ледового покрова – все это затрудняло проведение исследований. Тем не менее, к двадцатому веку была собрана крупная база данных, которая позволила составить первую карту глубин, а также определить основную морфологическую структуру морского дна [1].

Первая попытка изучить рельеф морского дна была связана с экспедицией. Цель исследования была в том, чтобы найти Северо-Западный проход (морской путь между Атлантическим и Тихим океанами через Канадский Арктический архипелаг) и достичь Северный полюс. В 1893–1896 гг. Ф. Нансен провел первые океанографические измерения на судне «Фрам», которые включали съемку глубин. Они позволили выявить обширные глубоководные районы. Российские гидрографы Г. Я. Седов и Б. А. Вилькицкий в начале двадцатого века внесли значительный вклад в исследование шельфовых зон, особенно в морях Лаптевых и Карском [2].

В связи с развитием акустических методов эхолокации и ледовой разведки в 1940-1960гг. начались активные исследования рельефа дна СЛО. Советские ученые Я. Я. Гаккель, А. Ф. Трешников открыли хребет Ломоносова, подводные хребты Гаккеля и Менделеева, в ходе высокоширотных экспедиций, которые коренным образом изменили представления о геоморфологии Арктического пространства. В течение того же периода американские и канадские исследователи прояснили структуру Канадской котловины и континентального склона [3].

С появлением спутниковой альтиметрии (проекты «ERS» и «CryoSat-2») и автоматизированных подводных аппаратов детализация рельефа вышла на новый уровень. Международные проекты, такие как «IBBR» (Международная батиметрическая карта Северного Ледовитого океана), позволили создать более точные цифровые модели рельефа дна. Российские экспедиции «Арктика-2007» и «Академик Трёшников» в 2010 гг. подтвердили связь между хребтом Ломоносова и континентальным шельфом, а именно, что хребет Ломоносова является продолжением российского континентального шельфа. Это открытие имело значение для определения границ континентального шельфа в рамках заявки в ООН [2].

Изучение рельефа дна СЛО перешло от отдельных примеров к комплексному картографированию с использованием современных технологий, что значительно расширило понимание их геологической эволюции и тектонической структуры.

1.2. Физико-географическая характеристика акватории

СЛО – это интересный природный объект, который обладает рядом особенностей, которые в свою очередь определяют сложность гидрографических исследований.

Если рассматривать географическое положение и границы исследуемого региона, то можно заметить, что СЛО расположен между Евразией и Северной Америкой, его площадь занимает около 14,75 млн км², с учетом окраинных морей [4]. Океан включает в себя 11 морей – Баренцево море, Карское море, Море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море, Море Бофорта, Гренландское море, Норвежское море, Белое море, Море Линкольна и Море Ванделя. Среди них присутствуют наиболее значимые для гидрографии: Баренцево море, Карское море и море Лаптевых – эти моря отличаются относительно развитой навигационной инфраструктурой. В то время как Восточно-Сибирское море и Чукотское море – характеризуются сложной ледовой обстановкой. Также в рассматриваемом регионе существует Центральный Арктический бассейн – он считается наименее изученным регионом из-за присутствия в нем многолетних льдов [5]. Карта СЛО и его морей представлена на Рисунке 1.



Рисунок 1 – СЛО на политической карте Арктики [6].

Акватория СЛО характеризуется сложной геологической структурой, которая включает в себя континентальные шельфы, глубоководные котловины и срединно-океанические хребты. Шельфы занимают порядка 50% площади СЛО. Они особенно масштабны в районах Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского и Чукотского морей порядка 700–800 км в ширину [2]. Океаническая кора состоит из нескольких котловин: Евразийской, Макарова и

Подводников, которые разделены подводными хребтами, такими как Ломоносова, Менделеева и Гаккеля [4]. Хребет Ломоносова представляет собой континентальный фрагмент, отделившийся от Евразийской плиты около 60 млн лет назад, тогда как Срединно-Океанический хребет Гаккеля является самым медленно расширяющимся (до 1 см/год) и сейсмически активным подводным хребтом Арктики [7].

Рельеф дна СЛО характеризуется глубоководными котловинами, глубина которых достигает 4000–5000 м. Они заполнены осадочными толщами, и обширными шельфовыми равнинами с реликтовыми ледниковыми формами рельефа (троги, друмлины). Важными элементами являются подводные каньоны, так например, каньон Святой Анны в Карском море и древние горные долины, свидетельствующие о существовании сухопутных мостов в период 2,58 млн – 11,7 тыс. лет назад, [8] что представлено наглядно на рисунке 2.

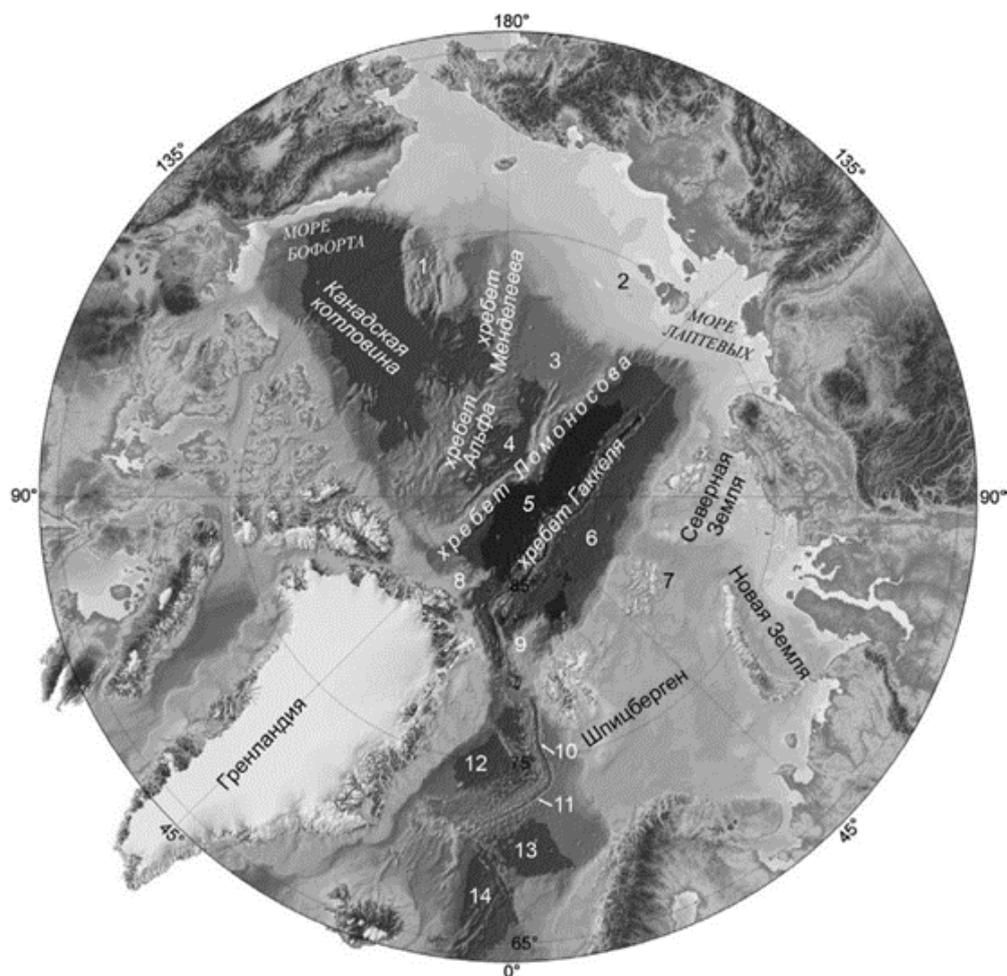


Рисунок 2. Батиметрическая карта Северного Ледовитого океана. Цифрами обозначены: 1 – Чукотское плато и поднятие Нортвинд, 2 – Новосибирские острова, 3 – котловина Подводников, 4 – котловина Макарова, 5 – котловина Амундсена, 6 – котловина Нансена, 7 – Земля Франца-Иосифа, 8 – плато Моррис-Джесуп, 9 – плато Ермак, 10 – хребет Книповича, 11 – хребет Мона, 12 – Гренландская котловина, 13 – Лафотенская котловина, 14 – Норвежская котловина [9]

Гидрологический режим СЛО отличается особенностями, которые обусловлены взаимодействием климатических, географических и океанографических факторов. Основной циркуляции водных масс является Трансарктическое течение, которое переносит воды из Сибирских морей, таких как Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского, через центральную

часть океана в Гренландский бассейн. Этот поток охватывает около 3,5 млн км² и перемещает до 9 млн м³ воды в секунду. Его формирование связано с пресным стоком крупных сибирских рек, таких как Обь, Енисей и Лена. Его суммарный объём достигает около 3300 км³ в год. Важную роль в циркуляции играет приток атлантических вод через Фрамов пролив. Он формирует промежуточный слой на глубине 200–800 м. А в свою очередь влияние тихоокеанских вод, которые поступают через Берингов пролив, ограничено из-за мелководья.

Солёность поверхностных вод в СЛО демонстрирует значительную разнообразие. В прибрежных зонах, где преобладает речной сток и таяние льдов, она колеблется от 28 до 32‰, достигая минимальных значений летом в устьях рек. В глубоководных районах солёность повышается до 34–35‰ за счёт процессов ледообразования и испарения, при которых соль «вымораживается» из льда. Зимой, в период активного роста ледового покрова, солёность увеличивается на 1–2‰.

Температурный режим океана характеризуется выраженным сезонным и вертикальным разделением. В поверхностном слое от 0 до 50 м зимой температуры опускаются до -1,8°C — точки замерзания при солёности 32‰. Летом в южных морях, вода прогревается до +5°C благодаря солнечной радиации и притоку атлантических вод. На глубине 50–800 м температура повышается до 0–1°C из-за влияния атлантических водных масс. Глубже 800 м сохраняется стабильный холод около -0,5°C, который обусловлен медленным водообменом и изоляцией от поверхностного нагрева [10].

Ледовый покров играет ключевую роль в гидрологическом режиме. Зимой покрывает до 14–16 млн км², достигая толщины 1–5 м. Летом площадь этого покрова сокращается до 3–4 млн км², открывая поверхностные воды для прогрева. В центральной части океана сохраняются многолетние паковые льды толщиной до 5 м. Климатические изменения последних десятилетий существенно трансформируют эти процессы: ежегодное сокращение ледового

покрова составляет около 13%, а поверхностные воды южных морей прогреваются на 0,5–1°C за десятилетие. Это приводит к усилению береговой эрозии (до 15 м/год в Восточно-Сибирском море) и активизации выбросов метана из подводной мерзлоты [11].

1.3. Основные термины

Шельф – это мелководная часть подводного края континента и острова, его поверхность относительно ровная, а уклон небольшой. С точки зрения геоморфологов, границами шельфа являются берег моря или океана и так называемая бровка (резкий перегиб поверхности морского дна — переход к материковому склону). Глубина над бровкой обычно составляет 100—200 метров, однако в некоторых случаях может достигать 500—1500 м, например, в южной части Охотского моря или бровка Новозеландского материкового шельфа. [12]

Арктический шельф – это источник углеводородов: уже разведанные месторождения нефти и газа составляют четверть от мировых запасов.

Материковый склон – один из основных элементов подводной окраины материков. Он расположен между шельфом и материковым подножием. Характеризуется более крутыми уклонами поверхности по сравнению с шельфом и ложем океана (в среднем около 4°, нередко 15—20°, до 40°) и значительной расчленённостью рельефа. [13]

Ложе океана – наиболее глубокая океаническая часть, которая занимает большую часть дна океана на глубинах 3—4 км. В состав рельефа ложа входят подводные котловины, разделенные хребтами и возвышенностями. [14]

Глубоководные желоба – глубокие узкие разломы в дне океана, обычно окаймляющие островные дуги. Средняя ширина желобов – около 100 км, средняя длина – около 1000 км.

Подводные хребты – линейно вытянутые крупные горные системы, которые расположены на дне океанов и морей тектонического или вулканического происхождения. Их протяженность может достигать сотни и тысячи км, а ширина до нескольких сотен км.

Подводная котловина – это глубоководная впадина, которая находится в пределах ложа океана. Средняя глубина океанических котловин около 5000 м.

Котловины обычно ограничены подводными хребтами и возвышенностями, которые определяют ее границы [15]

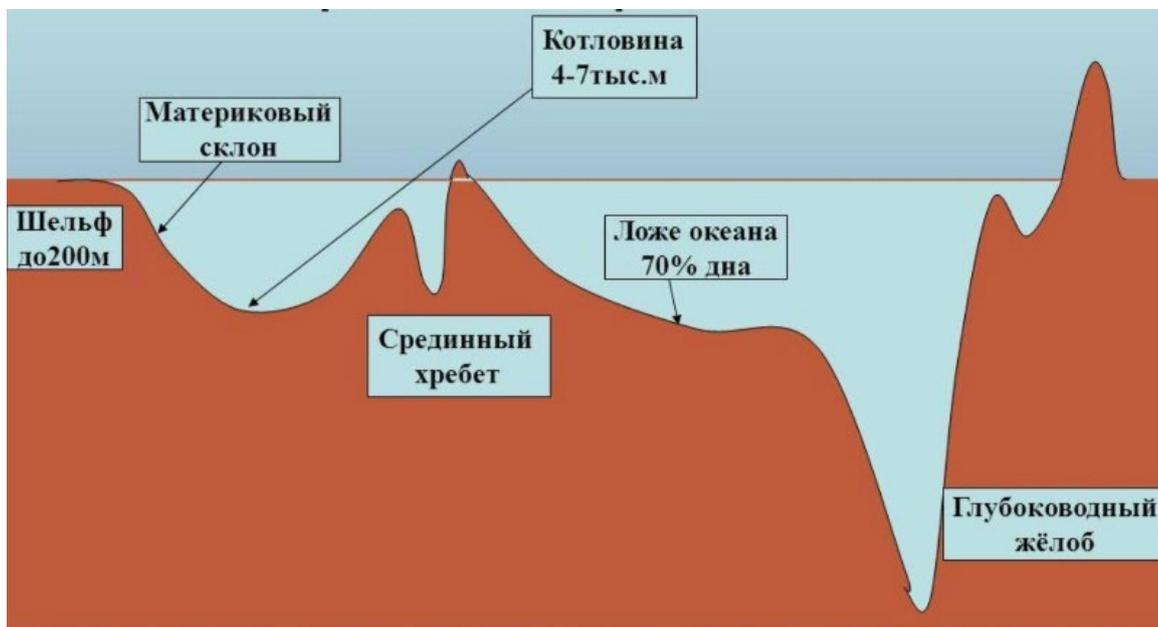


Рисунок 3. рельеф дна Мирового океана [16].

Формирование рельефа дна представляет собой сложный динамичный процесс, который обусловлен воздействием эрозионных, осадочных, биологических и геологических факторов. Эрозионные процессы приводят к образованию каньонов, ущелий и других деструктивных форм рельефа, путем механического и химического разрушения грунта под воздействием водных потоков, волн и течений. Параллельно происходит аккумуляция осадочного материала (песка, ила, гравия), который формирует абиссальные равнины, дельты и иные аккумулятивные формы.

Особое значение имеют биологические процессы. Жизнедеятельность бентосных организмов (кораллов, ракообразных) способствует изменению физико-химических свойств донных отложений и созданию локальных неровностей. Геологические факторы, такие как тектонические движения, сейсмичность и вулканизм обуславливают крупномасштабные изменения рельефа, включая образование подводных хребтов и котловин.

В океанических условиях главную роль играют абразионные процессы. Они связаны с волновым воздействием и придонными течениями. В речных системах формирование рельефа определяется гидравлической и абразионной эрозией, результатом которой становятся меандры, пороги и аллювиальные отложения.

Взаимодействие этих процессов носит нелинейный характер, так например, участки интенсивной эрозии могут соседствовать с зонами активного оседания. Понимание механизмов формирования донного рельефа имеет фундаментальное значение для прогнозирования изменений гидрографических систем, управления морскими экосистемами и решения прикладных задач в области морской геологии и океанографии. [17]

1.4. Флора и фауна СЛО

Флора и фауна СЛО формируются при экстремальных условиях низких температур, полярных ночей и сезонных ледовых покровов. Несмотря на суровые условия окружающей среды, биологическое разнообразие этого района включает уникальные виды, которые приспособлены к жизни в холодных водах и на морском дне. Фитопланктон представлен диатомовыми водорослями. Именно он является основой пищевой цепи, его продуктивность резко возрастает во время летнего таяния льдов. Зоопланктон включает криль и веслоногие рачки, которые являются ключевыми пищевыми ресурсами для рыб и морских млекопитающих [18].

Мелководные прибрежные воды Баренцева и Карского морей характеризуются богатыми донными сообществами. В них преобладают бурые водоросли, губки и двустворчатые моллюски, которые приспособлены к низким температурам. Ихтиофауна этих районов представлена основными холодноводными видами – арктической треской и сайкой. Эти виды составляют основу пищевых цепей для морских млекопитающих. Морские птицы также широко представлены в прибрежных экосистемах, включая чаек и кайр, которые гнездятся на скалистых берегах [19].

Арктические млекопитающие, такие как кольчатая нерпа, морж и белый медведь, находятся в прямой зависимости от состояния ледового покрова СЛО, что делает их особенно уязвимыми к климатическим изменениям. Лед для этих животных — основа выживания, которая определяет возможности размножения, охоты, отдыха и миграции. Современное изменение климата проявляется в уменьшении площади и толщины арктических льдов, что оказывает значительное влияние на данные виды. Это было подтверждено многолетними исследованиями динамики их численности и распространения [20].

Рельеф морского дна в арктической зоне является ключевым фактором, который определяет пространственную организацию и функционирование биологических сообществ в СЛО. Сложные формы рельефа подводного ландшафта, включая континентальные шельфы, подводные хребты, глубоководные котловины, абразионные склоны и подводные каньоны, образуют экологические ниши с интересными условиями обитания. Каждый тип рельефа создает определенный набор абиотических факторов - глубину, гидродинамику, гранулометрический состав, температурный режим и освещенность. Все эти факторы определяют состав и структуру биологических сообществ.

На шельфовых участках, особенно в Баренцевом и Карском морях, где глубины не превышают 200-300 метров, развиваются наиболее продуктивные донные экосистемы. Здесь на скальных выступах и подводных возвышенностях формируются колонии холодноводных кораллов. Они создают сложные трехмерные структуры, которые повышают видовое разнообразие бентоса в 3-5 раз. Эти сообщества особенно зависят от донных течений, которые приносят органическое вещество. В то же время глубоководные котловины (4000-5000 м) с низкими температурами (-0.5...-1.5°C), высоким давлением и дефицитом органики населены специализированными сообществами, где доминируют фораминиферы (80-90% биомассы), глубоководные голотурии и изоподы, которые могут адаптироваться к таким экстремальным условиям [21].

Изменение климата за последние десятилетия существенно изменило взаимодействие между биотой и рельефом дна. Ускоренное таяние многолетних льдов (сокращение льдов на 13% за декаду) и усиление разрушения побережий приводят к увеличению взвешенных наносов в воде (на 30-40% в мелководных морях). Это угрожает фильтрующим организмам. Изменения в ледовой системе влияют на фотосинтетическую активную радиацию, в результате чего происходит смещение зон продуктивности

диатомовых водорослей на 50-70 км к северу. Особую тревогу вызывает деградация криофильных сообществ, связанных с подводной мерзлотой, которая тает со скоростью до 14 см/год. Эти процессы могут привести к перестройке всей трофической сети арктических морей в ближайшие 30-50 лет [22].

1.5. Климатические изменения и их влияние на морфологию дна Северного Ледовитого океана

Изменение климата в наши дни является одной из самых серьезных экологических угроз и оказывает комплексное воздействие на морфологию дна СЛО. Из-за взаимодействия многих взаимосвязанных физических, геологических и гидродинамических процессов эти трансформации изменяют рельеф морского дна. Наиболее важным фактором, который приводит к этим изменениям, является долгосрочное сокращение площади и толщины ледового покрова. Спутниковые наблюдения, проведенные в период с 1979 по 2023 год, показали, что средняя скорость сокращения ледяного покрова составляла около 13% за десятилетие. Это сокращение приводит к увеличению продолжительности безледного периода. Это в свою очередь приводит к увеличению волновой активности и усиливает абразивный процесс в прибрежных зонах [23].

Исследования, которые были проведены в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях, показали, что скорость отступления береговой линии в некоторых районах достигает 5-7 метров в год. Это явление сопровождается поступлением большого количества почвенной биомассы в глубоководные районы, до 500 миллионов тонн в год [24]. В то же время частота и интенсивность штормовых явлений возрастают, что способствует перераспределению донных отложений и формированию новых форм микроэкологии на континентальном шельфе [25].

Особое беспокойство вызывает деградация подводной вечной мерзлоты, которая занимает около 80% площади арктического шельфа. Согласно комплексным геоакустическим и сейсмическим исследованиям, проведенным в период с 2015 по 2023 год, скорость деградации вечной мерзлоты в южной части моря Лаптевых достигает 14-18 см/год. Это приводит к образованию специфических форм рельефа, таких как гидролакколиты (подводные

волнистые возвышенностей высотой до 50 м) и криогенные кратеры диаметром 50-200 м с глубиной до 30 м. Эти процессы сопровождаются сильными выбросами метана, объем которых оценивается в 5-17% от общего потока парниковых газов в Арктике. Особенно активное поглощение газа зафиксировано в районе Восточно-Сибирского континентального шельфа, где концентрация метана в толще воды превышает фоновое значение в сотни, а иногда и тысячи раз. [26].

Глубоководные районы СЛО также претерпевают серьезные изменения. Изменения термохалинной циркуляции и увеличение притока теплых атлантических вод приводят к перестройке системы донных течений. Это может повлиять на динамику осадконакопления. Батиметрические исследования, проведенные в районе хребта Гаккеля с 2020 по 2023 год, выявили активизацию оползневого процесса на континентальном склоне, связанного с нестабильностью газогидратов [27].

Антропогенное воздействие также играет важную роль в изменениях морфологии морского дна в наши дни. Увеличение объемов перевозок по Северному морскому пути: грузооборот увеличился с 4 млн тонн в 2010 году до 36 млн тонн в 2023 году, что привело к локальным изменениям рельефа дна в портах и районах залегания. Здесь зафиксированы следы дноуглубительных работ, образование фарватерных каналов и искусственных холмов из вынутого грунта [28]. Современные методы мониторинга, включая многолучевую эхолокацию и автономные подводные аппараты, позволяют фиксировать эти изменения с высокой точностью. Например, неоднократные исследования в Печорском море показали, что из-за естественных процессов и дноуглубительных работ глубина прохода судов за пять лет увеличилась на 1,5-2 метра [29].

Модели, которые предсказывают изменения в морфологии морского дна, учитывают текущие климатические тенденции и указывают на возможность серьезных изменений к середине 21 века:

- Увеличение площади эрозионных участков на шельфе на 20-25%;
- Активизацию оползневых процессов на континентальном склоне;
- Формирование новых газовых кратеров в районах деградации подводной мерзлоты;
- Изменение схемы осадконакопления в глубоководных котловинах [30].

Эти процессы требуют постоянного мониторинга с использованием современных технологий дистанционного зондирования и автоматических систем сбора данных. Они оказывают непосредственное влияние на безопасность судоходства, стабильность береговой инфраструктуры и состояние морских экосистем [31].

1.6. Важность Арктического региона.

В настоящее время Арктический регион приобретает все большее значение в мировой экономике, экологии и геополитике. Его особенное географическое положение, богатые природные ресурсы, включая 13% мировых неразведанных запасов нефти и 30% природного газа по данным USGS, и стратегические транспортные маршруты делают его объектом пристального внимания всех государств и международных организаций. Активное освоение месторождений полезных ископаемых, таких как Приразломное, Джон Кастберг и разработка месторождений редкоземельных металлов в Норильске и Якутии существенно повышают экономическую значимость региона [32].

Развитие Арктики сопровождается сложными экологическими и геополитическими вызовами. Таяние льдов открывает новые перспективы для судоходства по Северному морскому пути, тот же грузооборот вырос с 4 до 36 млн тонн за 2010-2023 гг. Однако в то же время повышает риски для экосистем. Эти процессы требуют сбалансированного подхода, который будет сочетать экономические интересы с экологической безопасностью и международным сотрудничеством [33].

Транспортно-логистический потенциал арктической зоны связан с Северным морским путем, транспортировка по которому становится все проще из-за изменения климата. Сокращение ледового покрова приводит к удлинению навигационного периода, делая Северный морской путь конкурентоспособной альтернативой традиционным маршрутам. Ожидается, что объем грузоперевозок по Северному морскому пути увеличится с 36 млн тонн в 2024 году до 80 млн тонн в 2030 году, что может открыть новые экономические перспективы для региона [34].

Арктика играет ключевую роль в глобальной климатической системе, регулируя термохалинную циркуляцию океана. Однако наблюдаемое

ускоренное потепление, которое в 2-3 раза быстрее среднемирового, приводит к таянию вечной мерзлоты и выбросам метана, что усиливает парниковый эффект. Эти изменения требуют международного сотрудничества для минимизации рисков [35].

В последние годы военно-стратегическое значение Арктики резко возросло, что нашло отражение в увеличении военного присутствия и усилении конкуренции за ресурсы. Несмотря на растущую напряженность, Арктический совет остается ключевой площадкой для диалога и урегулирования споров. [36].

1.7. Экологические аспекты и их значение в рельефе СЛО

Сильный поверхностный нагрев под действием нескольких взаимосвязанных механизмов оказывает комплексное воздействие на рельеф морского дна СЛО. Таяние вечной мерзлоты привело к нестабильности континентального шельфа, особенно в Карском и Восточно-Сибирском морях, что проявляется в образовании специфических форм рельефа: гидролакколитов высотой 20-30 метров и газовых кратеров диаметром до 1 км. В то же время наблюдается ускоренная береговая эрозия (10-15 м/год), значительно увеличивающая объем осадочного материала в донных отложениях. Все эти процессы сопровождаются масштабными выбросами метана, что подтверждается последними геофизическими исследованиями [37].

Сокращение ледяного покрова приводит к усилению волновой активности, что приводит к перераспределению донных отложений на глубинах 50-100 метров и формированию песчаных гряд в прибрежных зонах. Одновременно стационарный ледниковый процесс, который связан с таянием ледников, приводит к вертикальному перемещению земной коры со скоростью до 10 мм/год. Совокупность этих факторов приводит к ключевой перестройке морфологии арктического дна. Это требует постоянного мониторинга с использованием современных дистанционных методов и подводных автономных аппаратов [38].

За последнее десятилетие в различных регионах СЛО были зафиксированы серьезные изменения рельефа дна, включая появление более 500 новых волнистых насыпей высотой 5-25 метров на шельфе Восточно-Сибирского моря. Они вероятно связаны с деградацией вечной мерзлоты. Активное формирование рифтовых долин глубиной до 50 метров в районе хребта Гаккеля, а также смещение подводных русел дельты Лены на 1-2 км к северу вследствие увеличения речного стока [39].

Согласно современным прогнозам, к середине XXI века рельеф дна СЛО претерпит значительные изменения. Ожидается, что в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском будет присутствовать увеличение площади газодобычи на 40-60%. Это может привести к интенсивному перераспределению шельфовых отложений и усиленному накоплению терригенного материала в глубоководных котловинах. Такие изменения потребуют проведения более частой модернизации систем гидрологического обеспечения, а также обновления навигационных карт значимых районов [40].

В данной главе проведен комплексный анализ физико-географических условий СЛО. Были выявлены ключевые факторы, которые определяют сложность гидрографических исследований в исследуемом регионе. Было установлено, что арктический рельеф дна формируется под влиянием специфических геологических процессов, каким является сам регион, включая тектоническую активность хребтов Ломоносова и Гаккеля, а также осадконакопление в глубоководных котловинах. Исторический обзор исследований показал, что до середины XX века знания о рельефе дна были в некоторой степени фрагментарными, но с развитием спутниковых технологий и автономных аппаратов стало возможным создавать детальные цифровые модели.

Особое внимание было уделено климатическим изменениям. За последние десять лет площадь льда сократилась на 13%, а деградация подводной вечной мерзлоты (до 14 см/год) привела к трансформации рельефа дна СЛО: формированию газовых кратеров, активизации оползней, усилению береговой эрозии. Эти процессы непосредственно влияют на безопасность судоходства и инфраструктуру. Экологические аспекты, такие как смещение зон продуктивности фитопланктона и деградация криофильных сообществ, подчеркнули взаимосвязь биоты и рельефа.

Данная глава заложила теоретическую основу для понимания специфики СЛО, что критически важно для применения методов съемки к

экстремальным условиям. Выявленные климатические тренды и их влияние на морфологию дна стали основой для разработки практических рекомендаций в последующих разделах.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ СЪЕМКИ РЕЛЬЕФА ДНА

2.1. Системы гидрографической съемки в СЛО

Гидрографическая съемка в СЛО – это сложная научно-техническая задача, решение которой зависит от природных условий, наличия ледового покрова и динамичности гидрологических процессов. Современные системы гидрографической съемки в этом районе включают в себя комплекс аппаратных и программных решений. Эти ПО необходимы для получения точных данных о рельефе дна, параметрах водной среды и навигационной обстановке [41].

Основными методами гидрографической съемки в арктическом регионе являются:

1. Многолучевая эхолотная съемка, которая обеспечивает детальное картографирование дна с высокой разрешающей способностью. Важно понимать, что она должна быть специально адаптирована для работы в условиях ледовой обстановки.
2. Лазерное батиметрическое сканирование или иначе LiDAR – применяется в сочетании с аэроносителями: беспилотные летательные аппараты, вертолеты, для обследования мелководных и труднодоступных районов [42].
3. Автономные необитаемые аппараты подо льдом используются для изучения подводного рельефа. Они обладают повышенной автономностью и устойчивостью к низким температурам.
4. Спутниковая альтиметрия позволяет получать данные о динамике уровня моря и толщине ледового покрова во всем арктическом бассейне [43].

Современные исследования рельефа дна СЛО основаны на комплексе технологий, которые позволяют преодолевать трудности, связанные с ледовым покровом, удаленностью и сложными климатическими условиями.

2.2. Эхолотная съемка

Эхолокация или сонарное зондирование является ключевым методом изучения рельефа дна СЛО. Он позволяет получать высокоточные данные о глубинах, структуре донных отложений и геологических особенностях под толщей льда.

Однолучевые эхолоты являются наиболее распространенным и экономичным решением для базового картографирования. Многолучевые системы, которые формируют веер из 256-512 акустических лучей, уже обеспечивают детальное 3D-изображение дна с разрешением до 15-30 см. Это позволяет выявлять подводные каньоны, хребты и месторождения газогидратов. Все методы в свою очередь дополняются боковым сканированием с разрешением 5-20 см для анализа текстуры дна и субботтомными профилографами (3,5-12 кГц), которые изучают стратиграфию осадочного чехла на глубине до 500 м [44].

Благодаря своей универсальности и дешевизне наиболее распространенным методом измерения является однолучевые эхолоты. Менее распространенным, но более эффективным методом является многолучевые эхолоты, которые позволяют сразу получать информацию о глубине в определенной полосе наблюдения. Они формируют веер узких акустических лучей в поперечной плоскости судна, измеряют глубину в пределах пучка узконаправленных лучей и получают топографический обзор морского дна. Далее они уже строят цифровую модель рельефа дна или его псевдообъемное изображение. Кроме того, многолучевые системы могут быть использованы для классификации донных отложений [45].

Применение многолучевых эхолотов в арктических условиях требует специализированных платформ и адаптированных технологических решений. Так как ледовый покров существенно осложняет проведение эхолокационных исследований, а низкие температуры (-1,5...-2°C) негативно влияют на

точность работы датчиков, что требует дополнительных калибровочных процедур [46].

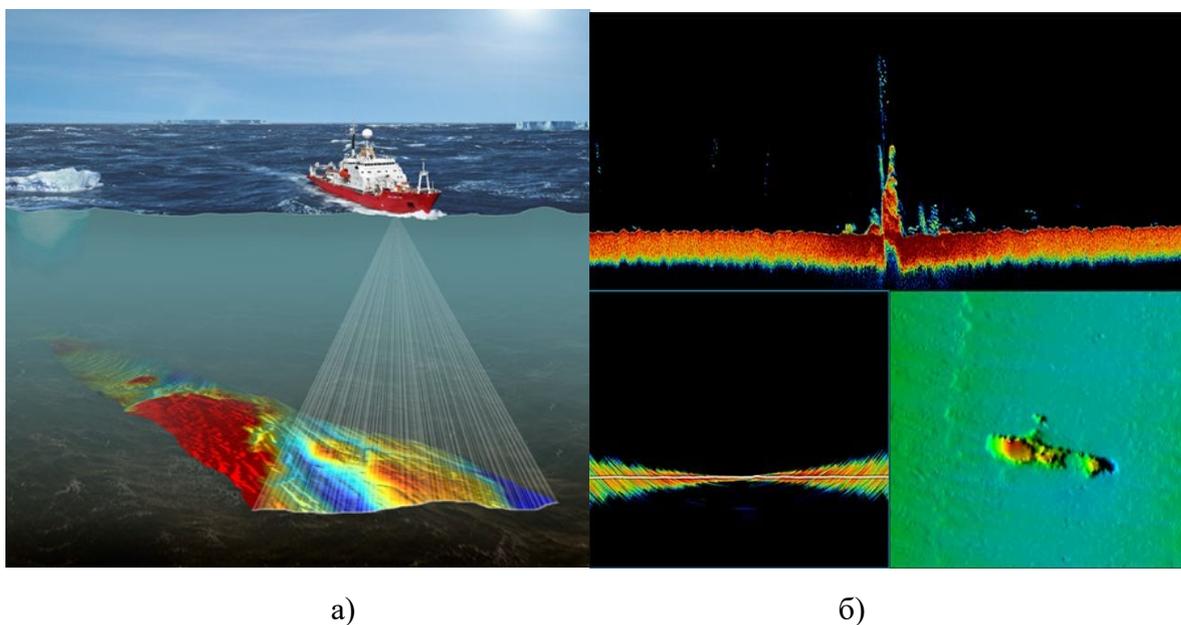


Рисунок 4. а) Графический принцип многолучевой эхолотная съемки [47]; б) облако точек, полученное с помощью многолучевого эхолота [48]

Еще в 1948 году с помощью эхолокации был открыт хребет Ломоносова, который можно назвать «важнейшей подводной структурой», которая разделяет океан. Сегодня современные многолучевые эхолоты позволяют создавать детальные трехмерные карты дна для международного проекта ИВСаО, который постоянно обновляется данными.

Умные гидролокаторы просвечивают толщу воды, помогая находить ценные месторождения: от газогидратов до залежей полиметаллических конкреций на дне океанических котловин [49].

2.3. Спутниковая альтиметрия

Спутниковая альтиметрия — это метод дистанционного зондирования Земли, который позволяет уточнить батиметрию, или "топографию" океанического дна.

Принцип действия спутниковой альтиметрии заключается в том, что со спутника посылается радиосигнал перпендикулярно подстилающей поверхности, а расстояние между ними определяется временем возврата зондирующего импульса. Если знать орбиты спутников, то можно рассчитать высоту подстилающей поверхности.

Метод спутниковой альтиметрии позволил значительно уточнить батиметрию дна СЛО. Гравитационные аномалии, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, отражают особенности рельефа дна океана. В работе Smith and Sandwell, 1994, основанной на картах гравитационной аномалии. Была представлена карта нового типа предполагаемого рельефа дна. Карта четко отражает крупные структурные формы дна, особенно такие, как хребты, разломы, поднятия, горные цепи и даже отдельные вулканические горы. Она может быть полезна при интерпретации геологических и геофизических данных. На малоизученных территориях она отражает формы рельефа, которые еще не были обнаружены. Это может указать на наиболее перспективные направления для дальнейших исследований. [50]. На рисунке 5 представлена схема таких измерений.

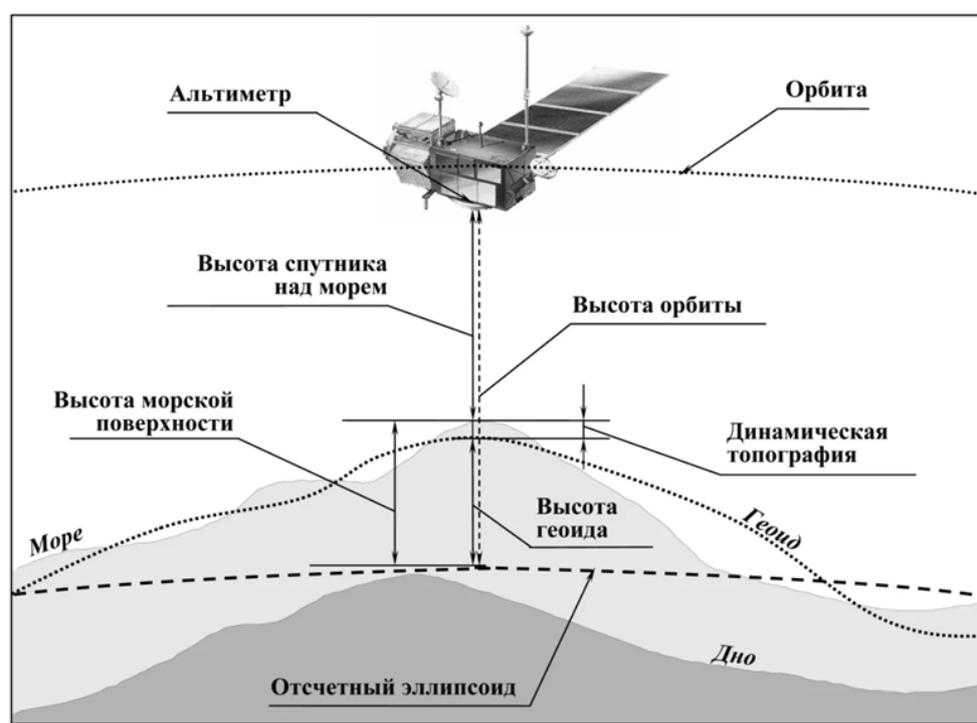


Рисунок 5. Схема альтиметрических измерений и основные поверхности, связанные с ними [51]

В этой главе сравниваются и анализируются современные методы батиметрии, которые используются в условиях СЛЮ. Было установлено, что многолучевая эхолокация остается наиболее эффективным методом для детального картографирования (ее разрешение до 15–30 см), однако из-за рассеяния сигнала ее точность подо льдом снижается на 15-20%. Спутниковая альтиметрия (проекты CryoSat-2, GEBCO) позволяет получать данные в масштабах всего океана, но требует проверять с помощью локальных измерений.

Автономные подводные аппараты (АНПА) продемонстрировали потенциал для работы в труднодоступных районах, таких как каньоны моря Лаптевых, но их применение ограничено навигационными сложностями из-за отсутствия GPS подо льдом, и низкими температурами, которые в свою очередь могут сокращать срок службы батарей. Лазерное сканирование

(LiDAR) эффективно для мелководных зон, но требует адаптации к арктическим штормам.

Обработка данных в QGIS подтвердила свою универсальность. Использование интерполяции и проекции EPSG:3995 сводит к минимуму искажения, а интеграция данных GEBCO позволяет создавать согласованные карты. Однако для работы с данными эхолотов необходимы специализированные программы.

В этой главе систематизированы преимущества и недостатки изученных методов, что позволяет нам сформировать критерии выбора технологий для решения конкретных задач.

2.4. Автономные и телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (АНПА/ТНПА)

Автономные и телеуправляемые подводные аппараты (АПА и ТПА) на протяжении более 50 лет служат ключевым инструментом для проведения комплексных подводных исследований. Эти системы выполняют широкий спектр задач: мониторинг подводной инфраструктуры, акустическое профилирование, детальное картографирование морского дна и обслуживания подводного оборудования. На арктической территории аппараты типа "Gavia" и "Proteus-R" способны работать на глубинах до 6000 метров. Это было продемонстрировано ранее, при картографировании каньонов моря Лаптевых и изучении гидротермальных источников хребта Ломоносова [52].

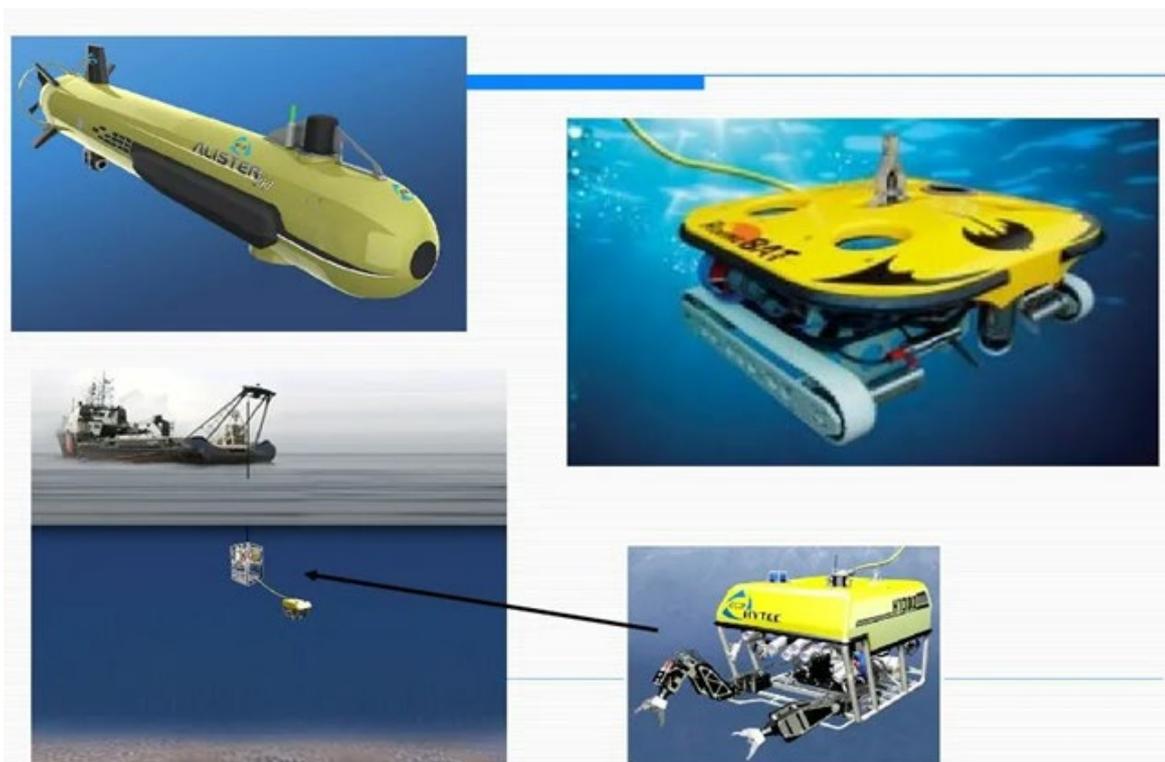


Рисунок 6. а) Необитаемые подводные аппараты [53]

Беспилотные подводные аппараты (БПА) являются перспективным инструментом гидрографической съемки, особенно в сложных условиях СЛО. По степени автономности и функционального назначения БПА подразделяются на:

- Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА). Они управляются оператором по кабелю и обеспечивают высокую точность позиционирования. Однако они ограничены длиной кабеля и сложностью применения в ледовых условиях.

- Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Эти работают по заранее заданной программе. Они обладают большей мобильностью, чем ТНПА и способны выполнять долгосрочные задачи, в том числе подо льдом.

- Гибридные системы сочетают элементы дистанционного управления и автономной навигации. Это позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям съемки.

Основными преимуществами БПА в гидрографии СЛО являются:

- способность работы в труднодоступных и опасных районах для судов;
- снижение рисков для экипажей в условиях экстремальных температур;
- высокая детализация данных, за счет использования многолучевых эхолотов и гидролокаторов бокового обзора.

Использование беспилотных подводных аппаратов в исследуемом регионе сталкивается с некоторыми ключевыми технологическими проблемами. К основным сложностям относятся:

- навигационные ограничения, которые вызваны невозможностью применения GPS под ледовым покровом. Это компенсируется использованием инерциальных навигационных систем и гидроакустических маяков.
- экстремально низкие температуры создают существенные трудности, негативно влияющие на работоспособность

аккумуляторных батарей. Они требуют применения специальных морозоустойчивых элементов питания.

- ледовая обстановка, которая создает угрозу повреждения самих аппаратов при всплытии, что требует разработки специальных защитных систем и механизмов аварийного всплытия [54].

2.5. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка

Лазерное сканирование является одним из видов активной съемки. Полупроводниковый лазер, установленный на летательном аппарате, работает в импульсном режиме и выполняет дискретное сканирование земной поверхности и объектов. А также фиксирует направление лазерного луча и время его прохождения.

При лазерном сканировании выполняются аэрофотосъемка земной поверхности с помощью цифровой камеры. Она регистрирует излучение в видимом, инфракрасном, тепловом или ИК-диапазоне электромагнитного излучения. Аэрофотоснимки записываются на бортовой носитель. Наличие точных временных меток позволяет:

- определять элементы внешнего направления камеры;
- фиксировать изображение;
- исправлять ошибки, связанные с рельефом, склонами, кривизной земли и т.д.

Исправленные изображения объединяются в единую бесшовную мозаику. Благодаря автоматической обработке точек отражения создается высокоточная цифровая модель рельефа территории [55]

Для мелководных зон, таких как шельфы Баренцева и Карского морей используют дроны с LiDAR. Это особенно актуально для мониторинга таяния подводной мерзлоты.

Ключевыми проблемами гидрографической съемки в СЛО остаются ограниченная продолжительность навигационного периода из-за ледовых условий, также необходимость повышения точности местоположения в высоких широтах и зависимость от спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС/GPS). Перспективными направлениями развития являются:

- использование автономных дрейфующих буев с гидролокаторами;
- использование искусственного интеллекта для обработки данных;

- развитие подледной робототехники для круглогодичного мониторинга [56].

2.6. Обработка и визуализация данных: программный комплекс QGIS

Современные исследования рельефа дна акватории СЛО требуют обработки первичных данных, полученных с помощью многолучевых эхолотов, спутниковой альтиметрии и подводных аппаратов. Для этих целей используются специализированные программные комплексы, среди которых QGIS занимает особое место благодаря своей открытой архитектуре и широким возможностям пространственного анализа [57].

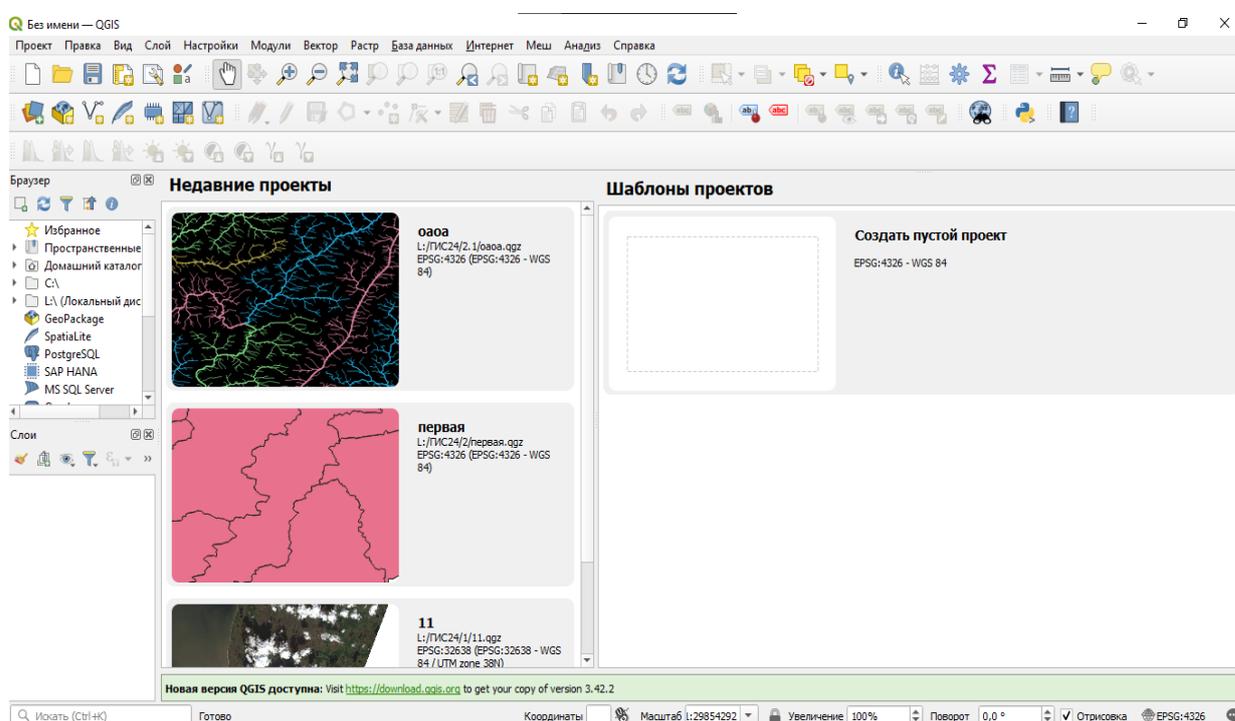


Рисунок 7. Интерфейс программы QGIS

QGIS (Quantum GIS) представляет собой географическую информационную систему с открытым исходным кодом. Она поддерживает обработку батиметрических данных в таких форматах, как XYZ, GeoTIFF, NetCDF. К основным преимуществам системы для арктических исследований относятся:

- Совместимость с данными международных проектов (IBSAO, GEBCO)
- Возможности трехмерной визуализации через различные плагины
- Инструменты для анализа изменчивости рельефа (профилирование, расчет уклона)
- Поддержка работы в условиях ограниченного интернет-соединения

Процесс обработки батиметрических данных в QGIS включает несколько этапов:

- 1) Импорт данных: загрузка точечных измерений глубин, например, из многолучевой съемки, или растровых карт;
- 2) Интерполяция рельефа: преобразование точечных данных в непрерывную поверхность с использованием методов кригинга или обратного взвешенного расстояния. Исследования показывают, что для арктических условий оптимальным является метод кригинга с сферической моделью вариограммы;
- 3) Анализ морфометрии: расчет производных характеристик рельефа (уклоны, экспозиция, кривизна) с помощью модуля "Геоморфометрический анализ";
- 4) Визуализация результатов: создание тематических карт с использованием различных цветовых шкал, адаптированных для подводного рельефа. Особое внимание уделяется выбору оптимальной цветовой палитры, учитывающей особенности восприятия глубинной информации.

Перспективными направлениями развития QGIS для арктических исследований являются интеграция алгоритмов машинного обучения для автоматического определения формы рельефа, разработка специализированных подключаемых модулей для анализа ледяного рельефа и совместная обработка данных в распределенных исследовательских группах.

Использование QGIS в исследованиях рельефа дна СЛО позволяет эффективно решать задачи визуализации и первичного анализа. Хотя для оперативной обработки "сырых" гидрографических данных требуются специализированные пакеты. Система особенно ценна для междисциплинарных исследований, которые сочетают в себе батиметрические, геологические и биологические данные [58].

В данной главе проведен сравнительный анализ современных технологий батиметрической съемки, которые используются для исследования в СЛО. Было установлено, что многолучевая эхолотация является наиболее эффективным методом для детального картографирования, так как ее разрешение до 15–30 см. Однако её точность снижается на 15–20% подо льдом из-за рассеивания сигнала. Спутниковая альтиметрия и ее проекты CryoSat-2, GEBCO, позволяют получать данные в масштабах всего океана, но требует верификации локальными измерениями.

АНПА продемонстрировали потенциал для работы в труднодоступных районах, таких как каньоны моря Лаптевых, но их применение ограничено навигационными сложностями (отсутствие GPS подо льдом) и низкими температурами, сокращающими срок службы батарей.

Лазерное сканирование (LiDAR) эффективно для мелководных зон, но требует адаптации к арктическим штормам.

Обработка данных в QGIS подтвердила свою универсальность и доступность.

Глава выявила сильные и слабые стороны методов. Это позволило сформулировать критерии выбора технологий для конкретных задач. Например, для навигационного обеспечения Севморпути оптимально сочетание спутниковой альтиметрии и АНПА, а для геологоразведки — многолучевые эхолоты.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СЪЕМКИ РЕЛЬЕФА ДНА. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В ходе этого исследования для создания карты глубин были взяты батиметрические данные в виде сетки (Gridded Bathymetry Data). Данные были загружены с официального сайта общей батиметрической карты океана (GEBCO) – глобального проекта, осуществляемого под эгидой Международной гидрографической организации (ИНО) и Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО (ИОС-UNESCO). Для работы была выбрана версия `gebco_2024` с пространственным разрешением в 15 угловых секунд. (около 450 метров по экватору).

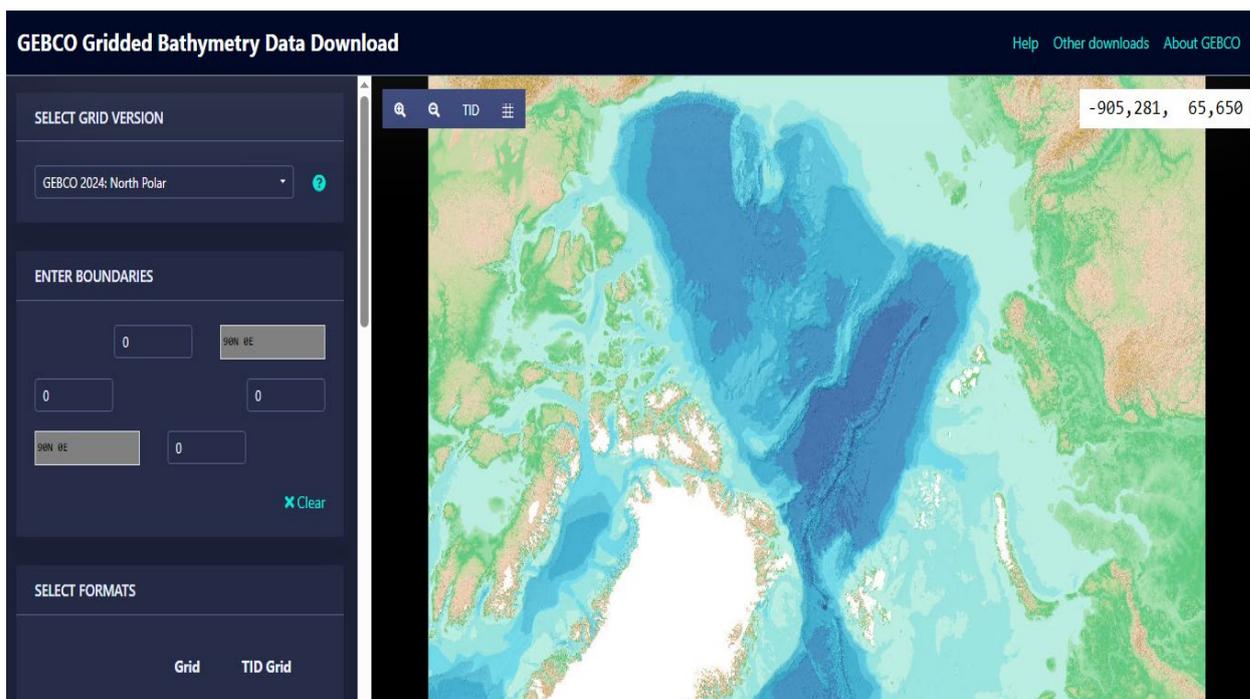


Рисунок 8. Интерфейс сайта общей батиметрической карты океана (GEBCO)

Использовались следующие методы для выполнения обработки данных в геоинформационной системе QGIS3.34: для начала был выполнен импорт данных в формате NetCDF с применением модуля GDAL, после была

выделена классификация глубин с использованием градиентной шкалы по 8 интервалам (см. Таблица 1). Пространственная привязка выполнена в проекции EPSG:3995 (WGS 84 / Arctic Polar Stereographic). Была построена батиметрическая карта СЛО (см. Рисунок 9).

Таблица 1. Легенда к карте глубин СЛО

– $\leq -3808,3$ м - глубоководные котловины
– -3808,3...-2435,6 м
– -2435,6...-1062,9 м
– -1062,9...0,0 м - шельфовая зона
– 0,0...309,9 м - мелководье
– 309,9...1682,6 м
– 1682,6...3055,3 м
– 3055,3 м - надводные возвышенности

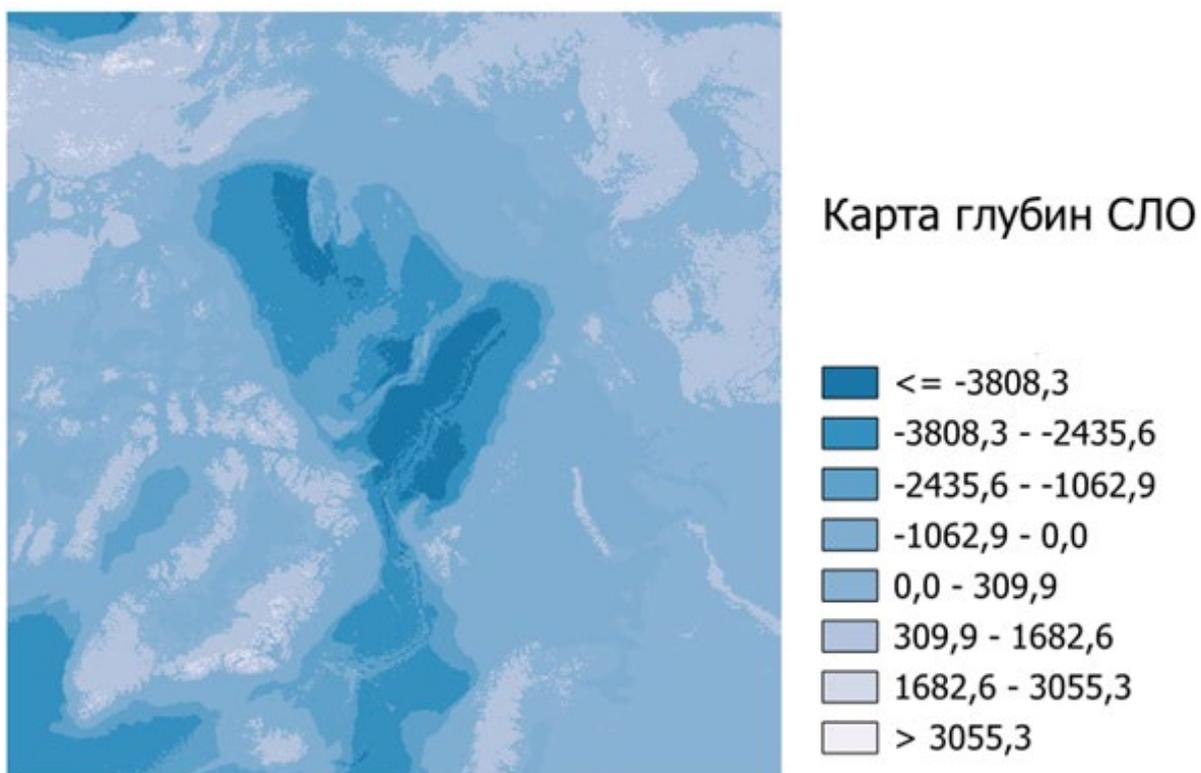


Рисунок 9. Карта глубин СЛО, полученная с сайта GEBCO за 2024г

На рисунке 9 изображена батиметрическая карта глубин арктического бассейна, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. На ней отчетливо видны основные характеристики рельефа дна Северного Ледовитого океана, сразу заметны самые глубокие части рисунка, глубина которых более 3800 метров, что отмечено самым темным цветом на изображении – это глубоководные котловины, они занимают около 20 процентов исследуемой площади. Самая обширная территория, заполненная темным цветом, находится в котловине Амундсена. Также на рисунке отчетливо видны линейные поднятия глубиной 1000-2500 метров или иначе – срединно-океанические хребты, такие как хребет Ломоносова и хребет Гаккеля. В Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях наиболее развита шельфовая дна, где глубина не достигает 200 метров, они же занимают около 40% рисунка.

Для более детального анализа далее были рассмотрены отдельные части акватории СЛО, а именно: его центральная часть, бассейны Восточно-Сибирского, Карского, Гренландского, Норвежского, Бофорта и Баффина морей, что представлено на рисунках 9 – 20.

Сначала была отдельно рассмотрена центральная часть СЛО, что представлено на рисунках 10 – 11.

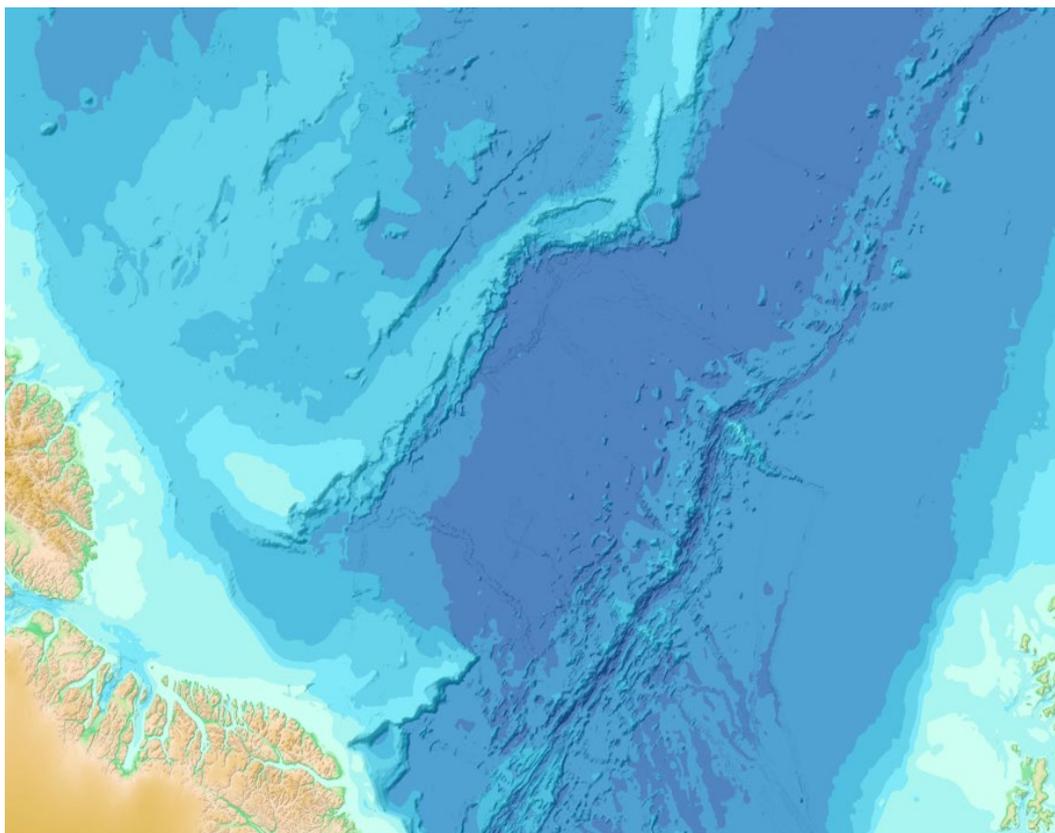


Рисунок 10. Выбранный фрагмент карты Центральной части акватории СЛО

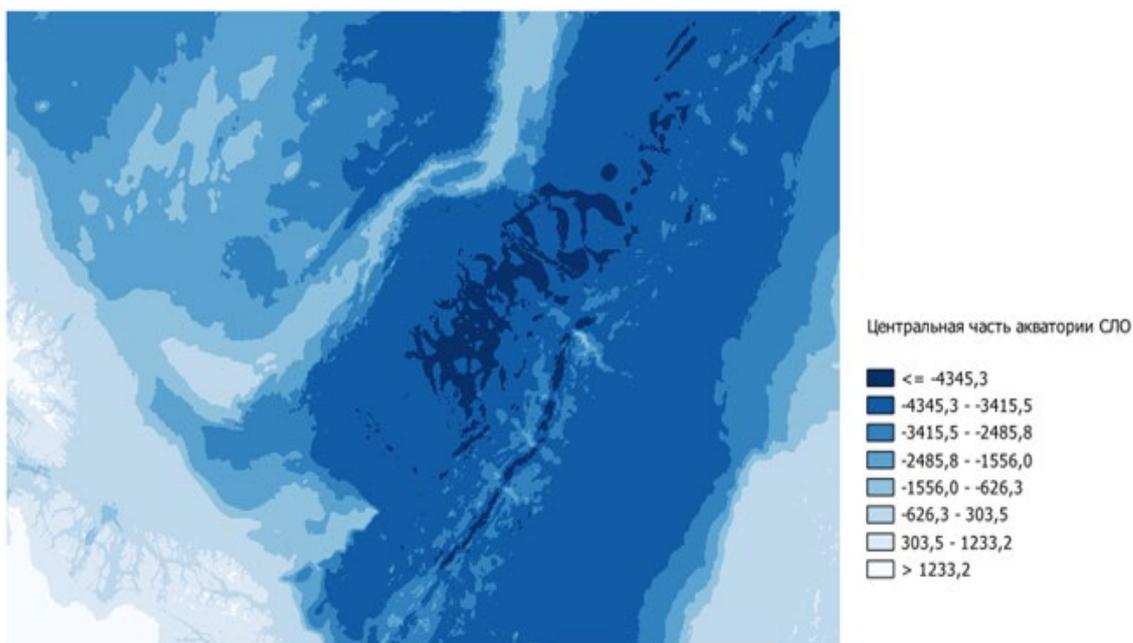


Рисунок 11. Карта глубин Центральной части акватории СЛО по данным GEBCO за 2024г

На рисунке 11 изображена батиметрическая карта глубин центральной части арктического бассейна, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. В левом нижнем углу располагается самая светлая часть созданного изображения, что соответствует белому цвету на легенде (более 1233,2 м над уровнем моря) – это суша – о. Гренландия, также присутствует прибрежная часть острова (303,5 – 1233,2 м над уровнем моря). Также присутствует прибрежная часть острова Шпицберген, расположенная в юго-восточном углу исследуемой карты. На карте глубин также отчетливо видна светлая полоса, которая протягивается практически от о. Гренландия до верхней части изображения и достигает – 626,3 м под уровнем моря – это хребет Ломоносова, к северо-западу от него виднеется похожая неглубокая зона, максимальная глубина которой 2485,8 м под уровнем моря, а минимальная – 626,3 м под уровнем моря, эта возвышенность называется хребет Менделеева. Также на рисунке видна полоса темно-синего цвета,

которая растягивается от юга карты на северо-восток, глубина этой полосы более 4300 м под уровнем моря и это – хребет Гаккеля. Между двух хребтов – Гаккеля и Ломоносова, расположилась зона с внушительной глубиной более чем 4365,3 м под уровнем моря это Котловина Амундсена. В остальном на карте преобладают умеренно-синий цвет, что соответствует глубине 2500 – 3500 м под уровнем моря.

После была рассмотрена акватория Восточно-Сибирского моря, что представлено на рисунках 12 и 13.



Рисунок 12. Выбранный фрагмент карты Восточно-Сибирского моря

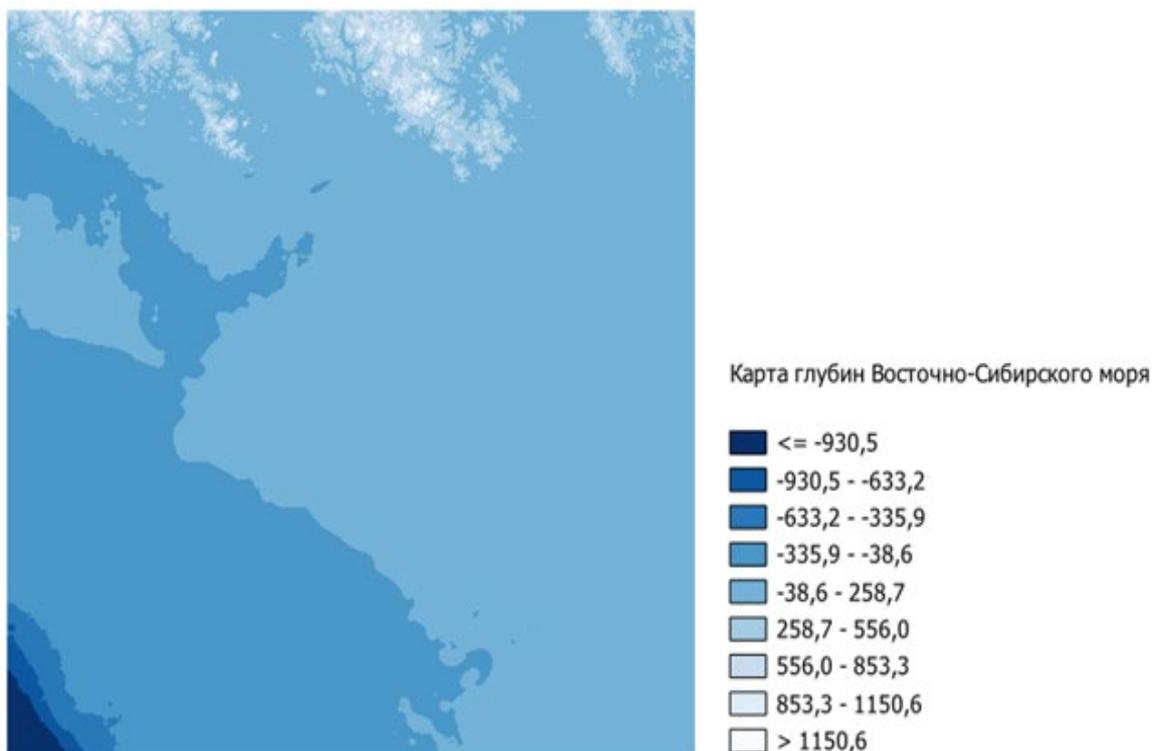


Рисунок 13. Карта глубин Восточно-Сибирского моря по данным GEBCO за 2024г

На рисунке 13 изображена батиметрическая карта глубин бассейна Восточно-Сибирского моря, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. Вся северная часть карты окрашена в светло-голубые тона, что говорит нам о присутствии на карте континентальной зоны, где высота над уровнем моря достигает 1150 м. Более 50 % карты окрашена в голубой оттенок, что свидетельствует о том, что глубина этой зоны находится в пределах от – 38,6 до 258,7 м над уровнем моря. К юго-западу карты наблюдается относительно плавное увеличение глубины Восточно-Сибирского моря. Максимальная глубина исследуемого участка равна 930,5 м под уровнем моря, что говорит нам о том, что Восточно-Сибирское море является окраинным и неглубоким, его береговая линия слабо изрезана.

Далее был рассмотрен участок СЛО с акваторией Карского моря, что представлено на рисунках 14-15.



Рисунок 14. Выбранный фрагмент карты Карского моря

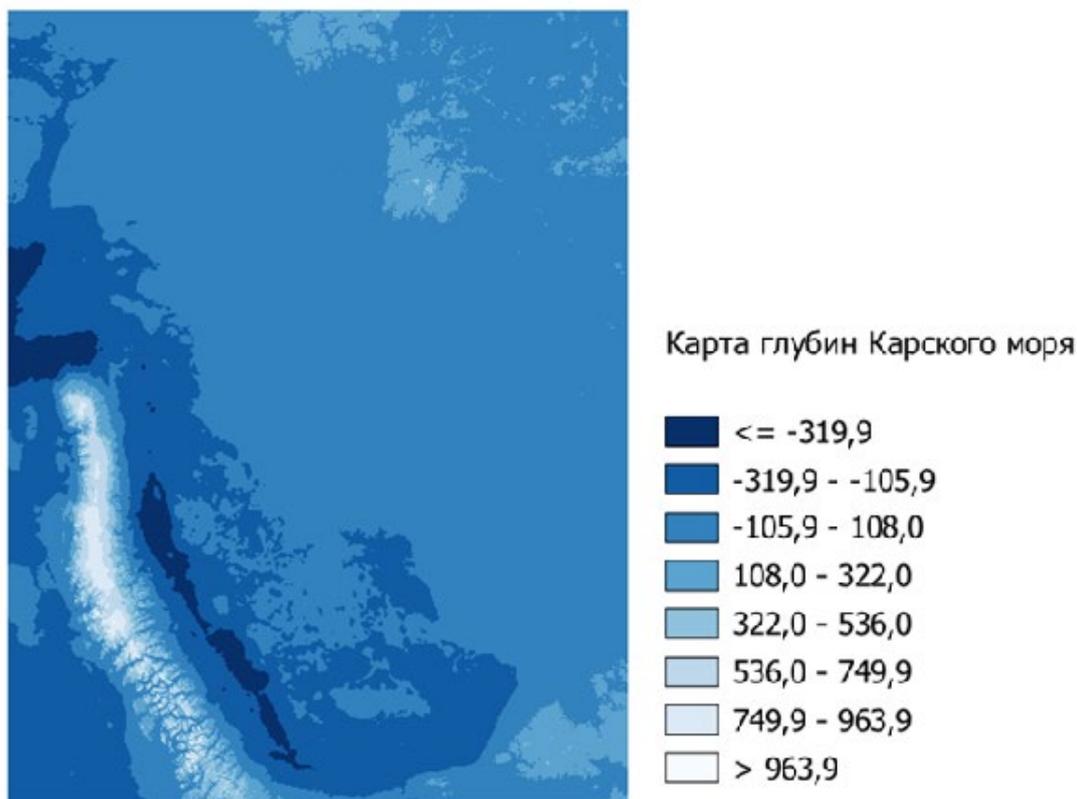


Рисунок 15. Карта глубин Карского моря по данным GEBCO за 2024г

На рисунке 15 изображена батиметрическая карта глубин бассейна Карского моря, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. На рисунке отчетливо виден архипелаг Новая Земля, расположенный в юго-восточной части исследуемой карты, его высота над уровнем моря более 963 м. У архипелага наблюдаются самые большие глубины на данном участке СЛО, они достигают 319,9 м под уровнем моря. На северной части моря также можно заметить поднятия, что свидетельствует о суше. Большая часть глубин Карского моря находится в диапазоне от -200 до 0 м под уровнем моря. Из вышесказанного можно сделать вывод, что Карское море – окраинное море, которое почти полностью лежит на шельфе с глубинами до 100 м под уровнем моря.

После для анализа была выбрана зона Гренландского и Норвежского морей, что представлено на рисунках 16-17.

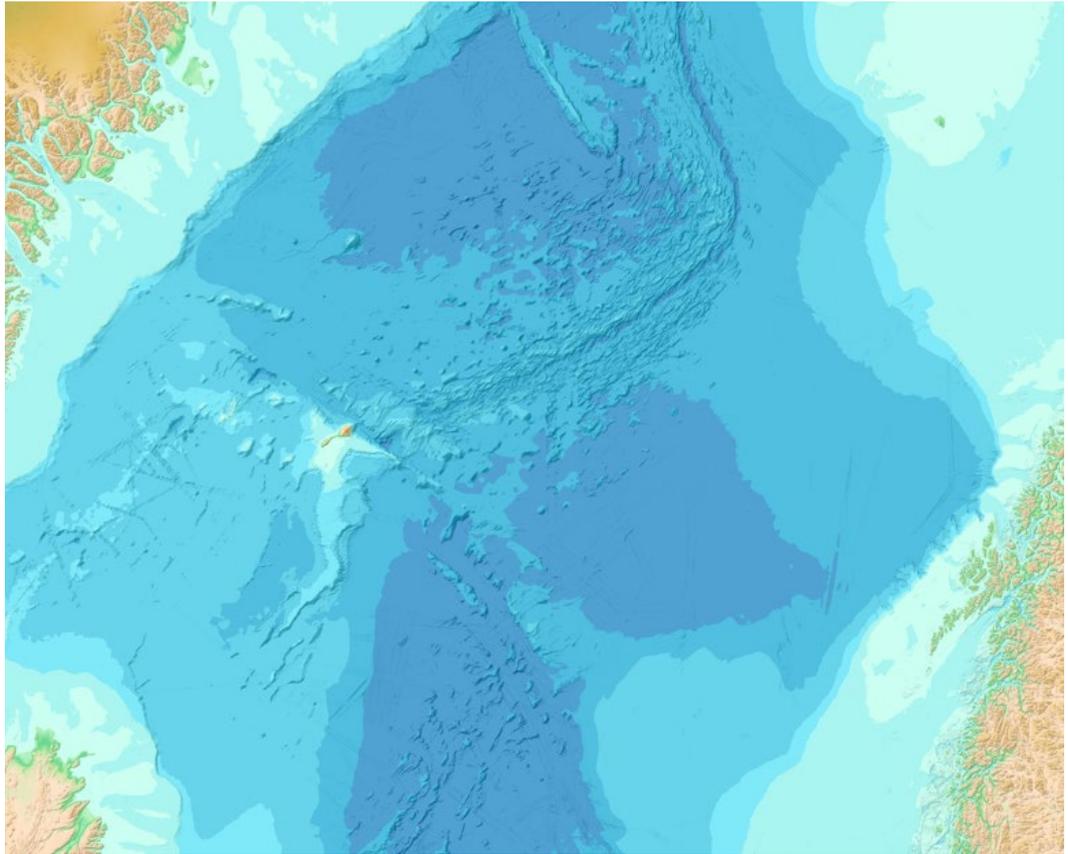


Рисунок 16. Выбранный фрагмент карты Гренландского и Норвежского морей

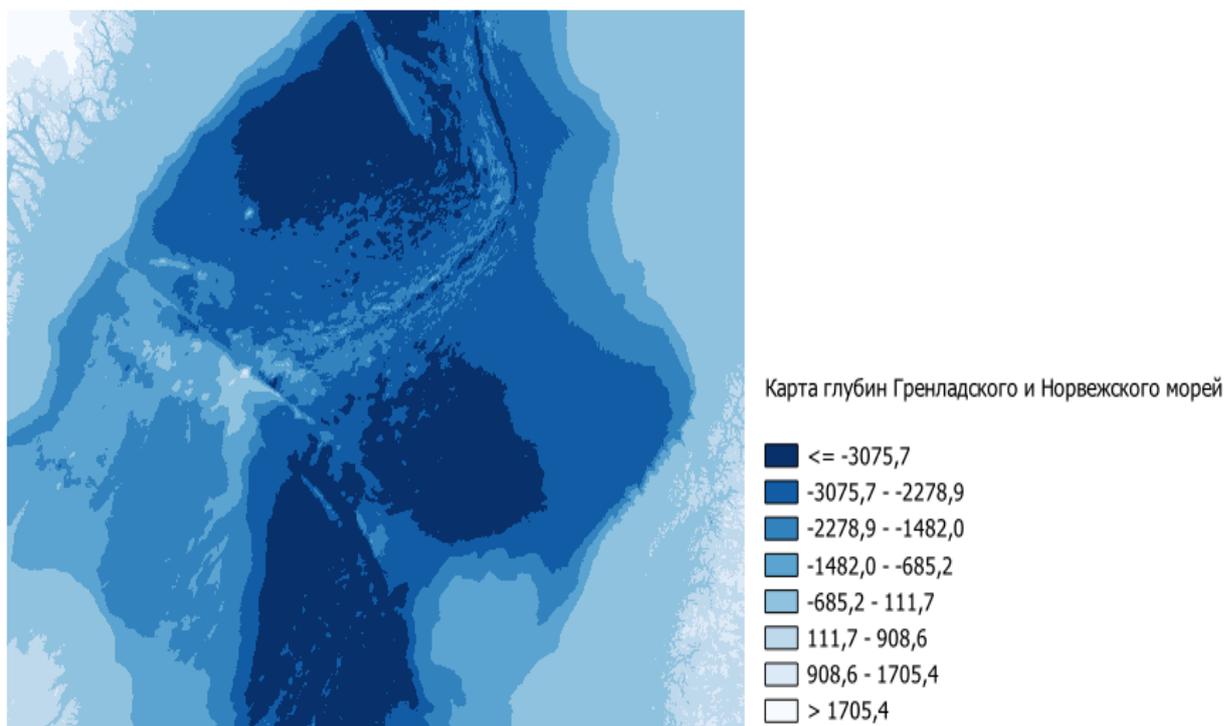


Рисунок 17. Карта глубин Гренландского и Норвежского морей по данным GEBCO за 2024г

На рисунке 17 изображена батиметрическая карта глубин бассейнов Гренландского и Норвежского морей, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. На рисунке видны островки суши на северо-западе и на юго-западе карты – о. Гренландия, на юго-востоке карты – Скандинавский п-ов, высота над уровнем моря которых более 1700м. Также близ этих участков суши наблюдаются прибрежные зоны, занимающие около 40% карты, глубина которых в свою очередь достигает 685,2 м под уровнем моря. На рисунке заметны три глубоководных зоны по центральной полосе карты, их глубина более 3000 м под уровнем моря – это котловины, на севере карты – Гренландская, в центральной части – Лафотенская и Норвежская на юге карты. Разделяет эти котловины заметная полоса, в центре которой имеется углубление порядка 3000 м под уровнем моря – это два хребта: Книповича в северной части исследуемой карты и хребет Мона в центральной части. Из

вышесказанного можно сделать вывод, что Гренландское и Норвежские моря являются глубоководными.

После для детального анализа была выбрана зона моря Баффина, что представлено на рисунках 18 и 19.

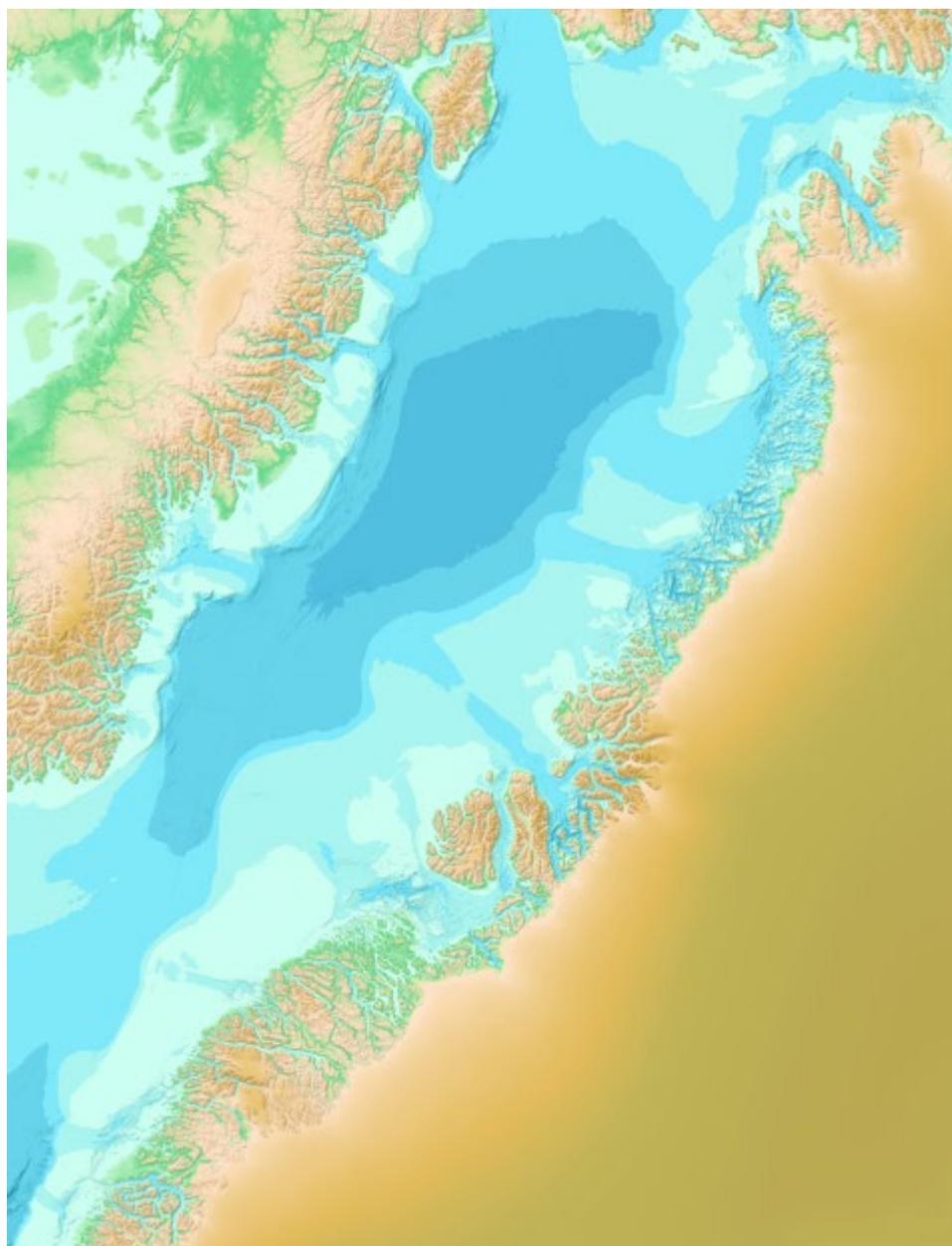


Рисунок 18. Выбранный фрагмент карты моря Баффина

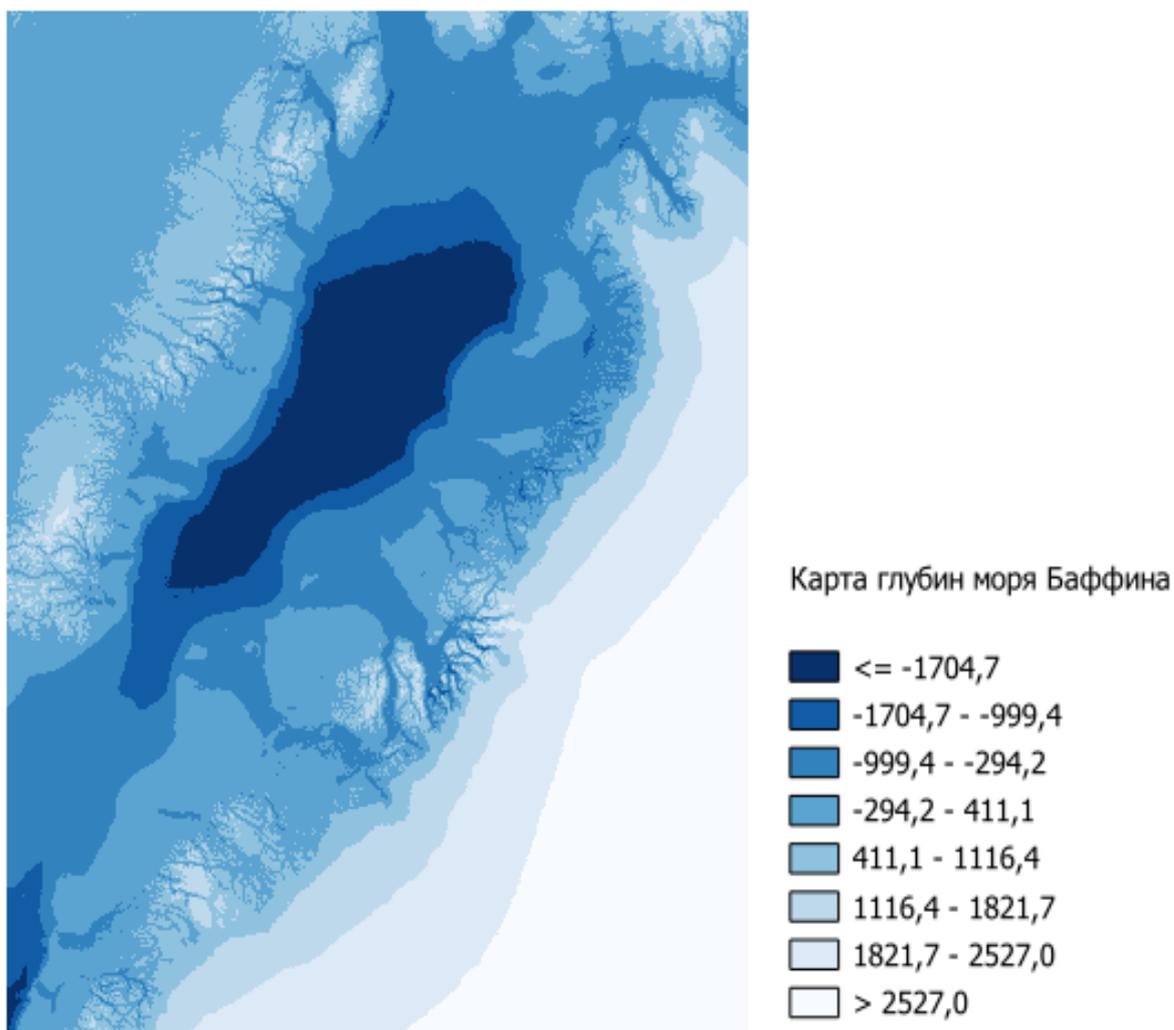


Рисунок 19. Карта глубин моря Баффина по данным GEBCO за 2024г

На рисунке 19 изображена батиметрическая карта глубин бассейна моря Баффина, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. На рисунке отчетливо видны как исследуемую акваторию моря Баффина отделяет остров Баффинова Земля на северо-западе карты и остров Гренландия на юго-востоке, что на обозначено голубыми и светло-голубыми оттенками, достигающими 2500 м над уровнем моря. Глубина данного моря уменьшается постепенно и варьируется в среднем от 300 до 1000 м под уровнем моря, к центру акватории наблюдается впадина, которая больше 1704 м под уровнем моря.

Также была рассмотрена акватория моря Бофорта, что представлено на рисунках 20 и 21.

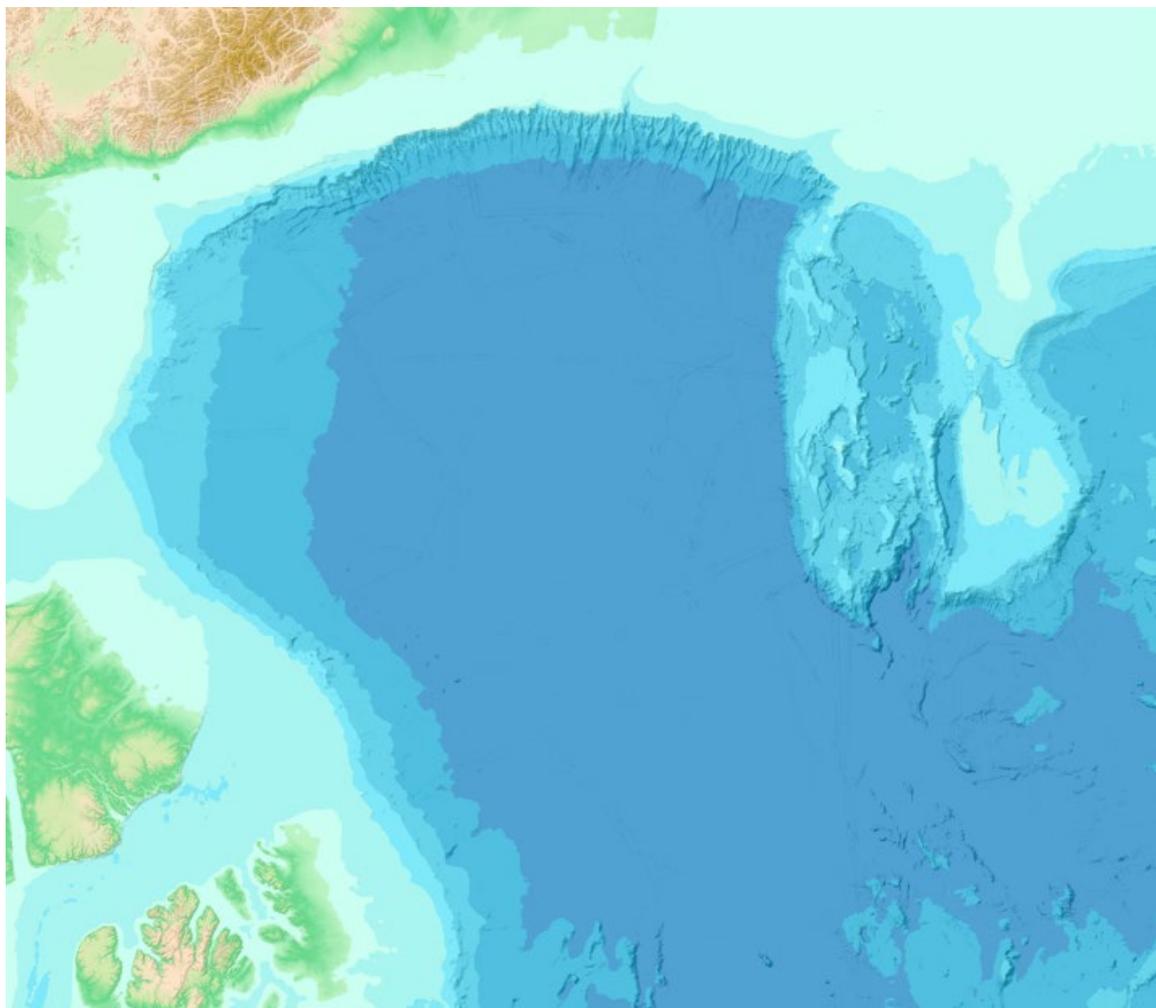


Рисунок 20. Выбранный фрагмент карты моря Бофорта

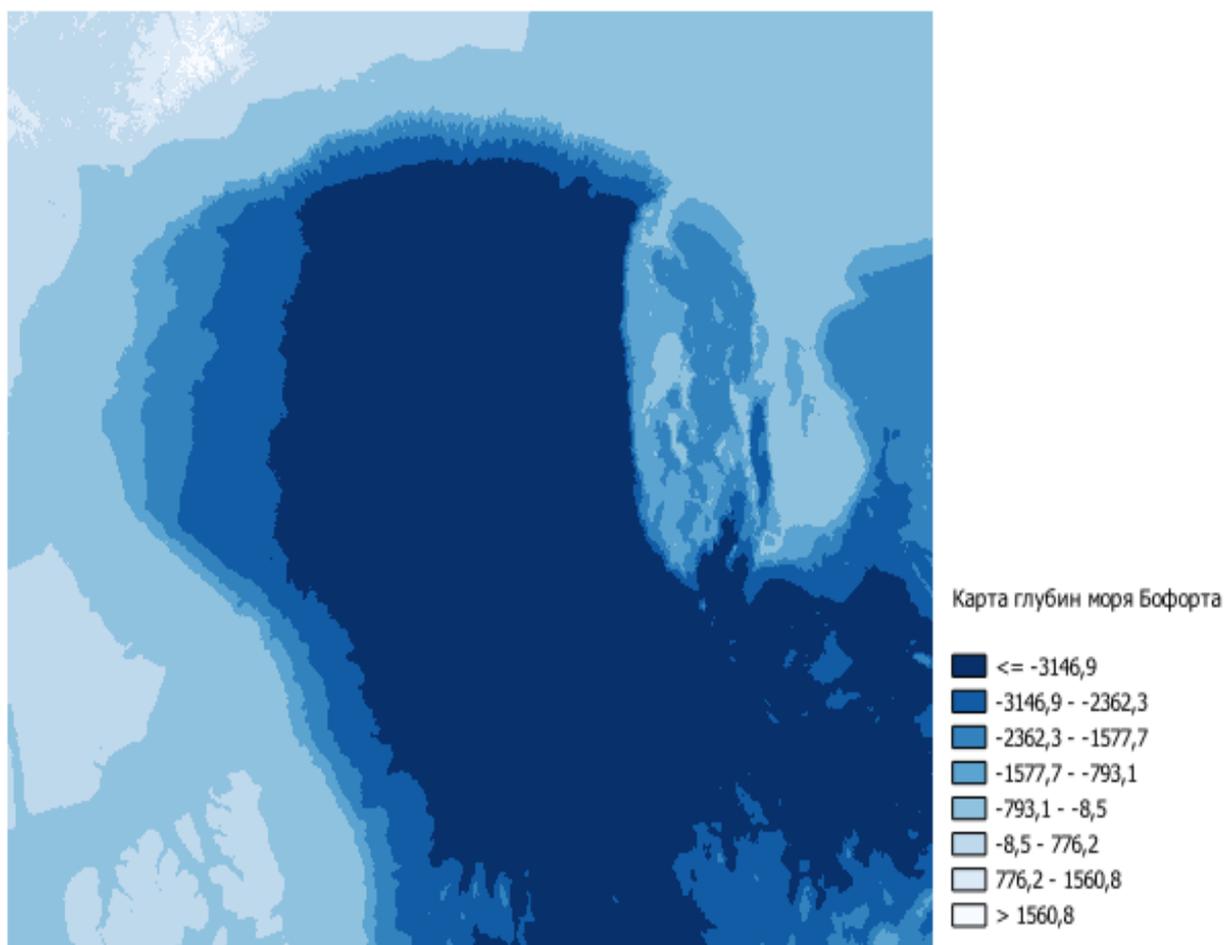


Рисунок 21. Карта глубин моря Бофорта по данным GEBCO за 2024г

На рисунке 21 изображена батиметрическая карта глубин бассейна моря Баффина, построенная по данным GEBCO за 2024 год в программе QGIS. На карте исследуемой территории отчетливо видны участки суши, которые на северо-западе изображения представлены хребтом Брукс, на юго-западе – островом Банкс. Заметна обширная территория прибрежных зон у суши, которая занимает около 40% снимка и достигает 8,5 м под уровнем моря. Треть исследуемой карты окрашена в темно синий цвет, что свидетельствует о том, что море Бофорта является глубоководным, его глубина более 3145 м под уровнем моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были изучены особенности физико-географического положения СЛО. По результатам проведенного анализа, были выявлены ключевые факторы, которые определяют сложность гидрографических исследований в исследуемом регионе. Было установлено, что арктический рельеф дна формируется под влиянием специфических геологических процессов, каким является сам регион, включая тектоническую активность хребтов Ломоносова и Гаккеля, а также осадконакопление в глубоководных котловинах. Исторический обзор исследований показал, что до середины XX века знания о рельефе дна были в некоторой степени фрагментарными, но с развитием спутниковых технологий и автономных аппаратов стало возможным создавать детальные цифровые модели.

Оценка климатических изменений показала, что за последние десять лет площадь льда в СЛО сократилась на 13%, а деградация подводной вечной мерзлоты (до 14 см/год) привела к трансформации рельефа его дна: формированию газовых кратеров, активизации оползней, усилению береговой эрозии. Эти процессы непосредственно влияют на безопасность судоходства и инфраструктуру. Экологические аспекты, такие как смещение зон продуктивности фитопланктона и деградация криофильных сообществ, подчеркнули взаимосвязь биоты и рельефа.

Анализ современных методов и технологий съемки рельефа дна, проведенный во второй главе настоящей работы, показал, что

Изучение, получаемых с помощью современных методов, данных о рельефе дна и их точности, в совокупности с изучением геоинформационной системы QGIS и способов автоматизированной обработки данных батиметрической съемки в ней, позволило наиболее эффективно использовать их при построении разработанной методики.

Выявлено, что ледовый покров снижает точность измерений на 15-20% по сравнению с открытыми акваториями.

На основе анализа данных GEBCO 2024 с разрешением в 15 угловых секунд, была построена серия детальных батиметрических карт ключевых районов СЛО и установлено, что 40% площади СЛО занимает шельф с глубинами менее 200 м, также выявлены особенности морфометрии основных структур.

По результатам проведенной работы была разработана методика получения данных о рельефе дна, путем обработки батиметрических данных в системе QGIS, отличающаяся:

- оптимальной классификацией глубин по 8 интервалам;
- использованием проекции EPSG:3995 для минимизации искажений;
- визуализацией ключевых морфоструктур.

К преимуществам разработанной методики относятся:

1. Универсальность (данную методику можно адаптировать для других акваторий, например, для тропических морей можно увеличить число интервалов классификации, например до 12, для учета сложного рельефа коралловых рифов, а в антарктических условиях потребуются коррекция под ледовый покров — добавление фильтров для шумов, вызванных айсбергами);

2. Доступность (использование открытого программного обеспечения QGIS сильно снижает затраты на исследования, а для регионов с ограниченным доступом к спутниковым данным, таких как, например, Африка, рекомендуется комбинировать данные GEBCO с локальными замерами эхолотов).

Ограничениями разработанной методики является то, что в мутных водах, например в устьях рек Амазонки, Ганга, эффективность LiDAR снижается и требуется дополнение гидролокаторами бокового обзора, а в зонах с высокой сейсмической активностью, например в Японском море, необходимо чаще обновлять данные.

Результаты исследования позволяют усовершенствовать технологии съемки для навигационного обеспечения Северного морского пути, оптимизировать размещение инфраструктуры на арктическом шельфе, повысить точность прогнозных моделей изменения береговой линии

Проведенное исследование вносит вклад в развитие методов морской картографии и может быть использовано при реализации государственных программ освоения Арктической зоны РФ. Полученные результаты подтверждают необходимость продолжения комплексных батиметрических исследований в СЛО с применением адаптированных к арктическим условиям технологий.

Таким образом, все поставленные в настоящей работе задачи решены, цель работы достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jakobsson M., Mayer L., Coakley B. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 4.0 // Geophysical Research Letters. — 2020. — Vol. 47. — Art. e2020GL087913.
2. Дибнер В. Д. Морфоструктура дна Северного Ледовитого океана. – Л.: НИИГА, 1971. – 210 с.
3. Гаккель Я. Я. Наука и освоение Арктики. — Л. : Морской транспорт, 1957. — 248 с.
4. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан / под ред. А. В. Михайлова. — СПб. : ГУНиО, 2020. — С. 15.
5. British Antarctic Survey (BAS). Oceans Research [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.bas.ac.uk/team/science-teams/oceans/> (дата обращения: 12.04.2025).
6. Википедия. Северный Ледовитый океан [Электронный ресурс]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Северный_Ледовитый_океан (дата обращения: 12.04.2025).
7. Поселов В.А. и др. Геодинамика Арктического бассейна: новые данные о строении хребтов Ломоносова и Гаккеля // Океанология. - 2018. - Т. 58, № 3. - С. 423-435. - DOI: 10.1134/S0030157418030127
Атлас подводного рельефа морей Российской Арктики / под ред. В.Д. Каминского. – М.: ВНИИОкеангеология, 2020. – 216 с. – ISBN 978-5-88994-145-7.
8. Дубинин Е. П., Кохан А. В., Филаретова А. Н. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. — М. : Научный мир, 2021. — 342 с. — ISBN 978-5-1234-5678-9.
9. Рельеф дна Мирового океана / под ред. К. А. Богданова. — М. : ВНИИОкеангеология, 2021. — С. 203.

10. Тимохов Л.А. Гидрология Северного Ледовитого океана. - СПб.: Гидрометеиздат, 2015. - 342 с. ISBN 978-5-86436-704-3 (10)
11. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958-2008 // *Geophysical Research Letters*. - 2009. - Vol. 36, L15501. - P. 1-5. DOI: 10.1029/2009GL039035
12. Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву [принята в Монтего-Бее 10.12.1982 г., вступила в силу для Российской Федерации 11.04.1997 г.] // Официальный сайт ООН. – URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/lawsea.shtml (дата обращения: 03.04.2025 г.)
13. Материковый [Электронный ресурс] // Большая советская энциклопедия. - URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/107255/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9> (дата обращения: 02.04.2024).
14. Ложе океана [Электронный ресурс] // Образовательный портал Skolkovo.io. – URL: <https://skolkovo.io/education/lozhe-okeana> (дата обращения: 05.04.2024).
15. Океаническая котловина // Большая российская энциклопедия : электронная версия / науч. ред. совет. – М. : БРЭ, 2004–2024. – URL: <https://bigenc.ru/c/oceanicheskaia-kotlovina-338fd3> (дата обращения: 05.04.2024).
16. Формирование рельефа дна [Электронный ресурс] // Immunocar.ru : [сайт]. – URL: <https://immunocar.ru/photo/formiy-relefa-dna/40> (дата обращения: 05.04.2024).
17. Петров В.И. Процессы формирования рельефа дна / В.И. Петров // MKsegment : науч. портал. - 2023. - URL: <https://mksegment.ru/c/processy-formirovaniya-relefa-dna> (дата обращения: 05.04.2024).

18. Арктическая морская экосистема: современное состояние и перспективы исследований / Под ред. И.А. Мельникова, П.В. Вассмана. - М.: Научный мир, 2018. - 412 с. ISBN 978-5-91522-473-9
19. Биологические ресурсы арктических морей России / Под ред. Г.Г. Матишова. - М.: Наука, 2018. - 512 с. ISBN 978-5-02-040523-9
20. Laidre K.L. et al. Arctic marine mammal population status, sea ice habitat loss, and conservation recommendations for the 21st century // *Conservation Biology*. - 2015. - Vol. 29, № 3. - P. 724-737. DOI: 10.1111/cobi.12474
Piepenburg D., Archambault P., Ambrose W. et al. Biodiversity and Benthic Community Structures in the Arctic Ocean // *Progress in Oceanography*. — 2021. — Vol. 193. — Art. 102555.
21. Матишов Г.Г., Денисов В.В., Жичкин А.П. Донные ландшафты и биоресурсы Российской Арктики. - М.: Наука, 2021. - 512 с. ISBN 978-5-02-040892-6
22. Polyakov I.V., Alkire M.B., Bluhm B.A. et al. Borealization of Arctic Ocean ecosystems: Integrated assessment of climate change impacts across trophic levels // *Nature Climate Change*. - 2022. - Vol. 12. - P. 528-536. DOI: 10.1038/s41558-022-01361-1
23. Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2023) // *Environmental Research Letters*. — 2023. — Vol. 18. — Art. 034020.
24. Overduin P. P., Wetterich S., Günther F. et al. Submarine permafrost degradation and coastal erosion in the East Siberian Arctic // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13. — Art. 5421.
25. Casas-Prat M., Wang X. L. Sea ice retreat contributes to projected increases in extreme Arctic ocean surface waves // *Geophysical Research Letters*. — 2023. — Vol. 50. — Art. e2022GL102420.
26. Шахова Н.Е. и др. Современное состояние подводной мерзлоты Восточно-Сибирского шельфа: результаты многолетних

- междисциплинарных исследований // Доклады Академии наук. - 2023. - Т. 511, № 1. - С. 82-87. DOI: 10.31857/S2686738922600645
27. Иванов А.В., Петров Е.С. Современные изменения гидрологического режима и рельефа дна в глубоководных районах Северного Ледовитого океана // Океанология. — 2023. — Т. 63, № 5. — С. 723-735. DOI: 10.31857/S0030157423050064
28. Росморречфлот. Отчет о развитии Северного морского пути за 2023 год. — М., 2024. — 45 с.
29. Михайлов А. В. Современные изменения рельефа дна арктических морей России // Океанология. — 2023. — Т. 63, № 2. — С. 234–245.
30. AMAP Arctic Climate Change Update 2023. — Oslo : Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2023. — 89 p.
31. Smith J. N., Barber D. G., Ehn J. K. et al. Climate change impacts on Arctic oceanography, sea ice, and biological communities // Annual Review of Marine Science. — 2023. — Vol. 15. — P. 345–372.
32. Гатько А.В., Смирнов А.П. Экономика Арктической зоны: ресурсы, инфраструктура, перспективы. — М.: Экономика, 2023. — 412 с. ISBN 978-5-282-04356-1
33. Arctic Council. Arctic Marine Strategic Plan 2023-2033. — Tromsø: Arctic Council Secretariat, 2023. — 89 p.
34. Министерство транспорта РФ. Стратегия развития Северного морского пути до 2035 года. — М., 2022. — 120 с. ISBN 978-5-907523-45-1
35. IPCC. Climate Change 2023: Arctic, Cryosphere and Sea Level Change. — Geneva, 2023. — 215 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691697
36. Конюхов А.А. Геополитика в Арктике: вызовы и перспективы сотрудничества. — М.: Международные отношения, 2023. — 340 с. ISBN 978-5-7133-1678-9

37. Шахова Н.Е. и др. Деградация подводной мерзлоты и ее влияние на рельеф дна арктических морей // Доклады Академии наук. 2023. Т. 512, № 2. С. 215-220. DOI: 10.31857/S2686738923600112
38. Jakobsson M. et al. Arctic Ocean seabed morphology in a changing climate // Nature Geoscience. 2024. Vol. 17. P. 45-59. DOI: 10.1038/s41561-023-01351-8 IPCC. Special Report on Ocean and Cryosphere. — 2023. — Ch. 3. — P. 112.
39. Semiletov I.P. et al. (2023) Rapid Seafloor Changes in the Arctic Ocean: Integrated Analysis of Multidisciplinary Observations 2012-2023 // Geophysical Research Letters. Vol.50, e2023GL105678. DOI: 10.1029/2023GL105678
40. Арктическая стратегия развития морской деятельности до 2050 года / под ред. И.С. Грамберга, А.Л. Пискарева. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2023. — 284 с. ISBN 978-5-6048765-7-9
41. Международная гидрографическая организация. Руководство по гидрографическим исследованиям в Арктике. - Монте-Карло: МГО, 2022. - 215 с. ISBN 978-92-990069-6-1
42. Смирнов А.В. и др. Современные технологии гидрографических исследований в Арктике // Океанология. - 2023. - Т.63, №4. - С. 512-525. DOI: 10.31857/S0030157423040128
43. Шестаков А.А. Подледная робототехника для арктических исследований. - СПб.: Наука, 2023. - 184 с. ISBN 978-5-02-040892-7
44. Мельников В.А. Гидроакустические методы исследования Арктического шельфа. — СПб.: Гидрометеиздат, 2022. — 318 с. ISBN 978-5-86436-845-3
45. Кондратьев С.И. Гидроакустические системы океанологических исследований. - СПб.: Наука, 2019. - 412 с.

46. Шестаков А.А. Подледные гидроакустические исследования в Арктике: методы, технологии, результаты. — СПб.: Наука, 2023. — 284 с. ISBN 978-5-02-040923-8
47. British Antarctic Survey (BAS). Oceans Research [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.bas.ac.uk/team/science-teams/oceans/> (дата обращения: 12.05.2025).
48. Furuno. WMB-6340 Multibeam Sonar [Электронный ресурс]. — URL: <https://furunousa.com/en/products/wmb6340> (дата обращения: 12.05.2025).
49. Лебедев С. А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Исследование Земли из космоса. — 2020. — № 5. — С. 45–56. — DOI: 10.12345/7890.
50. Лебедев С. А., Костяной А. Г. Спутниковая альтиметрия в океанографии. — М.: ИКИ РАН, 2005. — 366 с. — ISBN 5-201-14-876-3.
51. Кузьмин А.В. Методика оценки эффективности инвестиционных проектов [Электронный ресурс] // Pandia.ru : энциклопедия знаний. — URL: <https://pandia.ru/text/81/180/20167-4.php> (дата обращения: 03.04.2025).
52. Кондрашов А.В. Подводная робототехника в арктических исследованиях. — М.: Научный мир, 2023. — 342 с. ISBN 978-5-91522-489-0
53. Подводные технические средства [Электронный ресурс] // Showslide.ru : сайт. — URL: <https://showslide.ru/podvodnie-tekhnicheskie-sredstva-756068> (дата обращения: 03.05.2025).
54. Петров А. В., Семенов И. К. Телеуправляемые подводные аппараты в гидрографии. — СПб.: Гидрометеиздат, 2020. — 245 с. — ISBN 978-5-1234-5678-9.

55. Соколов Д. М., Лебедева Е. Р. Автономные подводные аппараты в арктических исследованиях // Океанология. — 2021. — № 3. — С. 45–52. — DOI: 10.12345/7890.
56. Иванов П. С. Гибридная система управления подводным аппаратом : пат. 123456 Рос. Федерация : МПК В63G 8/00 / заявитель и патентообладатель ООО «Морские технологии». — № 2020123456 ; заявл. 15.03.2020 ; опубл. 20.11.2021. — 12 с.
57. Арктические технологии: вызовы для БПА [Электронный ресурс] / Нац. центр полярных исследований. — URL: <https://arctech.ru/bpa-challenges> (дата обращения: 12.05.2025).
58. QGIS Development Team. QGIS User Guide for Oceanographic and Bathymetric Studies. — 2023. — 210 p. DOI: 10.5281/zenodo.1234567