

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Терёхина Яна Евгеньевна

**ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ
ПОДВОДНОГО ЛАНДШАФТА ПО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ
ДАНЫМ В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ**

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: *Токарев Михаил Юрьевич, кандидат технических наук*

Официальные оппоненты: *Соколов Сергей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники дна океанов, заведующий, главный научный сотрудник*

Сорохтин Николай Олегович, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН (г. Москва), лаборатория геодинамики, георесурсов, георисков и геоэкологии, главный научный сотрудник

Дорохов Дмитрий Владимирович, кандидат географических наук, Атлантическое отделение ФГБУН Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН (г. Калининград), лаборатория геологии Атлантики, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «26» декабря 2024 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, сектор «А», аудитория 415.

E-mail: dmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3193>.

Автореферат разослан «___» ноября 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ 016.6
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

Общая характеристика работы

В настоящее время северные регионы находятся под пристальным вниманием ученых всего мира в связи с интенсивным освоением шельфовых зон. Перед организациями, ведущими хозяйственную и навигационную деятельность, стоят задачи повышения достоверности и детальности инженерно-геологических и экологических изысканий, снижения рисков негативного воздействия на окружающую среду за счет оптимальной планировки территорий и выбора площадок (трасс) строительства, уменьшения издержек на выполнение изыскательских работ и природоохранных мероприятий. Эти задачи нашли отражение в новом своде правил по инженерным изысканиям для строительства на континентальном шельфе. Одним из возможных путей достижения этих целей является внедрение технологии картографирования подводных ландшафтов. Подводный ландшафт – территориальный комплекс, однородный по происхождению, геологическому строению и рельефу, гидрохимическим и гидрометеорологическим условиям, сообществам живых организмов (СП 504.1325800.2021, 2021).

Разработка методики применения современных высокотехнологичных геофизических методов для мультидисциплинарных исследований открывает широкие возможности для получения репрезентативных данных о геолого-геоморфологических компонентах подводных ландшафтов и состоянии морских экосистем, важных для рационального морского природопользования Арктической зоны РФ и эффективного освоения Северного морского пути (СМП).

Одним из традиционных объектов геологических исследований и апробации новых методов является Белое море. Рельеф дна Кандалакшского залива интенсивно расчленен, распространение ландшафтных выделов мозаично (Мокиевский В.О. и др., 2012), что позволяет на небольшом по площади участке отработать методику картирования донных ландшафтов, характерных для гляциальных шельфов разных типов.

Актуальность темы исследования

Традиционно для изучения геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов применяются прямые методы: отбор проб и визуальные наблюдения. При построении карт подводных ландшафтов современными нормативными документами, принятыми в РФ, рекомендуется дополнять данные

прямых методов материалами инженерно-геодезических и инженерно-геофизических изысканий (СП 504.1325800.2021), которые дают высокую плотность регулярных площадных многопараметрических данных.

В настоящий момент назрела необходимость в разработке оптимального комплекса дистанционных методов и методических рекомендаций по интерпретации для картирования абиотических компонентов подводного ландшафта.

Кроме того, в дополнение к «качественной» интерпретации необходимо разработать программные средства и методику «количественного», геостатистического анализа результатов гидроакустических наблюдений. Это связано с существованием ряда недостатков экспертной интерпретации:

- отсутствием повторяемости: результат интерпретации зависит от опыта и квалификации специалиста;
- проблемой обработки больших объемов данных: в настоящее время интерпретация проводится вручную, учитывая объем данных, это очень трудозатратный процесс;
- проблемами генерализации (upscaling): изменение масштаба в процессе обработки данных приводит к потере информации о микрорельефе;
- отсутствием адекватной модели ландшафта и установленных функциональных связей: для интерполяции компонентов подводного ландшафта на большие территории необходимы знания о взаимосвязи между ними.

Геолого-геоморфологические особенности Белого моря являются типовыми для западного (гляциального) шельфа Арктики, где в настоящее время ведется наиболее активная деятельность. Именно это и определило актуальность верификации разработанной технологии картирования геолого-геоморфологических компонентов подводного ландшафта по гидроакустическим данным на репрезентативных участках Кандалакшского залива Белого моря в различных масштабах исследований.

Степень разработанности

Применение геофизических, в первую очередь гидроакустических методов для картографирования подводных ландшафтов и изучения структуры донных сообществ началось уже в 1940-х годах (Fish J.P. et al., 1990). В настоящее время для изучения подводных ландшафтов используют множество биологических,

экологических, геологических, гидрографических, океанографических и геофизических данных, что создает реальные предпосылки для осуществления комплексного анализа многопараметрических данных (Brown C. et al., 2011).

Методические подходы при изучении подводных ландшафтов в различных масштабах отличаются набором методов. В первом случае используются данные дистанционных методов (аэрофотосъемка, спутниковые данные, морские геофизические наблюдения), что позволяет идентифицировать выделы масштаба местностей и ландшафтов (Гурьева и др., 1976). Во втором случае при преобладании оптических методов исследования (водолазные наблюдения, подводная фотосъемка) происходит выделение подводных ландшафтов по визуальному облику, при этом масштаб однородной зоны соответствует урочищам и фациям (Арзамасцев, Преображенский, 1990; Преображенский и др., 2000). Сочетание этих двух подходов (Мокиевский, 2006; Токарев, 2002; Орлова и др., 2014; Дорохов, 2018) в одном исследовании позволяет определять ландшафтные выделы масштабных уровней местностей, урочищ и фаций. В тоже время, технологии таких исследований не унифицированы.

Акватория Кандалакшского залива детально и систематически изучается геофизическими методами с середины 1960-х годов. За это время был накоплен колоссальный объем материала сейсмоакустических и гидроакустических исследований (Девдариани, 1985; Мокиевский В.О., 2006; Сорокин и др., 2009).

Цель диссертационной работы – идентификация и картирование геолого-геоморфологических компонентов ландшафтных выделов различного масштабного уровня Кандалакшского залива Белого моря с использованием авторской технологии сбора и анализа гидроакустических данных.

Для достижения цели диссертационной работы были решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ существующих методик изучения подводных ландшафтов и оценка их преимуществ и недостатков для предсказания геолого-геоморфологических компонентов ландшафтов.
2. Выполнен обзор результатов исследований геологического строения, геоморфологических особенностей и фациального районирования Кандалакшского залива Белого моря.

3. Разработана технология сбора гидроакустических данных и комплексного анализа геолого-геофизической информации, обеспечивающая идентификацию геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов

4. На тестовом полигоне в проливе Великая Салма проведены полевые исследования с использованием комплекса геолого-геофизических методов, включающего сейсмоакустические наблюдения, многолучевое эхолотирование, трехчастотную гидролокацию бокового обзора, геологический пробоотбор и подводные видеонаблюдения.

5. Выполнена апробация методики комплексной интерпретации разнородных данных для картографирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов.

6. В проливе Великая Салма Кандалакшского залива определены геолого-геоморфологические компоненты подводного ландшафта масштабных уровней, соответствующих рангу местностей, урочищ и фаций, и построены авторские карты.

Объектом исследования настоящей работы являются геолого-геоморфологические компоненты подводных ландшафтов гляциальных шельфов. **Предметом** исследования является определение этих компонентов подводных ландшафтов Кандалакшского залива Белого моря по комплексу методов.

Научная новизна

1. Впервые в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря выполнено крупномасштабное (1:25 000) картирование геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов по данным многолучевого эхолотирования и трехчастотной гидролокации бокового обзора.

2. Впервые для Кандалакшского залива по гидроакустическим изображениям определены признаки и предложена классификация форм ледникового и водно-ледникового мезорельефа.

3. Для Кандалакшского залива были определены новые формы экзарационного и аккумулятивного ледникового рельефа, например морены де Гира.

4. Предложен, обоснован и опробован состав оптимальных методов и параметры съемок, которые позволяют разделять основные геолого-геоморфологические элементы ландшафтов, включая донные осадки, формы микро- и мезорельефа и особенности геологического строения верхней части разреза на акваториях.

5. Разработан и опробован алгоритм картографирования подводных ландшафтов на гляциальных шельфах по комплексу гидроакустических данных.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанная автором технология картирования, включая методику количественной интерпретации, расширяет возможности применения геостатистических методов для анализа многопараметровой геофизической информации при изучении геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов по комплексу гидроакустических методов.

Разработанные алгоритмы анализа гидроакустических данных были реализованы в программном обеспечении САМГГИ, активно используемом при анализе данных в рамках инженерных изысканий ряда компаний.

Предложенный комплекс методов и параметры съемок были опробованы в научно-исследовательских работах по программе «Плавучий университет» и внедрены в производственном режиме в рамках научно-исследовательских и инженерно-экологических изысканиях на Белом и Карском морях в рамках выполнения госзадания по теме «Разработка методов идентификации и анализа опасных геологических процессов и явлений на акваториях Арктической зоны РФ» и НИР для НК «Роснефть» (Repkina et al., 2019).

Созданные карты геолого-геоморфологических (абиотических) компонентов подводных ландшафтов и каталог фаций пролива Великая Салма стали основой для междисциплинарных исследований по океанологии, геологии и морской биологии, проводимых различными научными организациями на ББС МГУ. На этом детально исследованном полигоне проводятся испытания новых методик, программно-аппаратных комплексов и долгосрочный мониторинг компонентов природной среды.

Картографирование абиотических компонентов подводного ландшафта используется для задания границ пространственного распределения бентосных сообществ при планировании сетки станций для отбора проб и оптимизации продолжительности полевых работ.

Практическое изучение подводных ландшафтов в настоящее время регламентировано на законодательном уровне при

строительстве на континентальном шельфе (СП 504.1325800.2021), и разработанная методология позволила существенно сократить сроки составления карт подводных ландшафтов при выполнении инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований.

Предложенная автором методика использования современных высокотехнологичных геофизических методов в комплексе мультидисциплинарных исследований открывает широкие возможности для получения репрезентативных данных о состоянии морских экосистем, важных для рационального природопользования, инженерных изысканий и морского пространственного планирования, что имеет теоретическую и практическую значимость.

Методология и методы исследования

При подготовке данной работы использовались результаты полевых геолого-геофизических наблюдений, полученных с участием автора в Кандалакшском заливе Белого моря в период с 2010 по 2024 год. Основными методами для получения данных были многолучевое эхолотирование, гидролокация бокового обзора и сейсмоакустические исследования.

Обработка и анализ данных гидролокации бокового обзора и многолучевого эхолотирования проведены в авторском программном обеспечении САМГТИ и специализированных программных пакетах SonarWiz и RadexPro. Для совместной интерпретации всех видов многопараметрических данных использовался интерпретационный программный продукт Kingdom и Global Mapper. Статистический анализ данных производился в пакете Statistica.

По определению подводный ландшафт – это относительно однородный участок морского дна, выделяющийся однотипным геологическим строением, рельефом, грунтами, гидроклиматом (температурой, соленостью, течениями, волновыми процессами) и специфическим набором сообществ гидробионтов (Большая российская энциклопедия, 2004–2017).

Масштабные уровни ландшафтов (ранги) в зависимости от площади и масштаба картирования представлены в таблице (таблица 1).

Таблица 1. Масштабные уровни ландшафтов (СП 502.1325800.2021, 2021)

Масштабные уровни ландшафтов (ранги)	Площадь	Масштаб картирования
Ландшафт	от 20–50 до нескольких сотен км ²	1:100 000 и мельче
Местность	5–50 км ²	1:100 000–1:50 000
Урочище	от 0,5–3 до 10–20 км ²	1:50 000–1:10 000
Фация	от 10–20 до 1–3 км ²	1:5 000 и крупнее

При картировании геолого-геоморфологических компонентов автор использовал термины, приведенные в таблице (Таблица 1), при анализе материала соответствующего масштабного ранга.

Положения, выносимые на защиту:

1. Геолого-геоморфологические компоненты шести ландшафтных выделов масштабного уровня местностей, установленных в результате комплексной интерпретации сейсмических наблюдений и данных эхолотирования в проливе Великая Салма, предопределены положением блоков фундамента, разделенных тектоническими нарушениями.
2. Геолого-геоморфологические компоненты пятнадцати ландшафтных выделов масштабного уровня урочищ, выделенных на основе авторской технологии по данным гидроакустических наблюдений в проливе Великая Салма, сформированы процессами, связанными с тектоническим и ледниковым воздействием.
3. Геолого-геоморфологические компоненты двадцати четырех ландшафтных выделов масштабного уровня фаций, определенных на основе авторской технологии по данным гидроакустических и геологических наблюдений в проливе Великая Салма, формируются совокупными действиями тектонических, ледниковых и современных морских аккумулятивно-денудационных процессов
4. Созданная технология сбора гидроакустических данных и комплексного анализа геолого-геофизической информации позволяет получать необходимую и достаточную информацию для картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов гляциальных шельфов.

Степень достоверности и апробация

Достоверность результатов исследования обеспечена получением лично автором большого объема полевых многопараметрических данных на протяжении более десяти лет.

Комплекс использованных сертифицированных методов гидроакустических наблюдений и верификация абиотических компонентов подводных ландшафтов прямыми наблюдениями с использованием фото- и видеоборудования создали уникальный банк достоверных разнородных данных для решения поставленных задач.

Разработанные подходы применялись в нескольких научно-производственных проектах по мониторингу состояния окружающей среды.

По теме диссертации опубликована одна книга и девять научных статей в изданиях, рекомендованных для защиты в МГУ по специальности.

По отдельным разделам работы автором было представлено более тридцати докладов на международных и российских конференциях, организуемых ведущими научными сообществами (EAFO, EAGE, SPE и др.).

Разработанное программное обеспечение и база данных зарегистрированы автором в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) (2020622371, 2020613109, 2020660123).

Личный вклад автора

Автор принимала участие в разработке концепции подводного ландшафтного картирования, формировании оптимального программно-аппаратного комплекса и разработке методики полевых наблюдений.

Автором был спроектирован прототип и составлено техническое задание для программного обеспечения обработки и количественного анализа гидроакустических данных.

Автор самостоятельно разработала методические основы комплексной интерпретации гидроакустических данных.

Автор самостоятельно планировала и проводила опытно-методические эксперименты по сейсмо- и гидроакустическим наблюдениям.

Автор принимала непосредственное участие в полевых работах по сбору геолого-геофизических данных, обработке и интерпретации материалов, позволивших картировать геолого-геоморфологические компоненты типового пролива подводного ландшафта Кандалакшского залива.

Автором выполнена интерпретация гидроакустической информации для составления Атласа по интерпретации геофизических данных для морской практики на Белом море (Старовойтов и др., 2018).

Автором изучены и построены карты геолого-геоморфологических компонентов ранга местностей и урочищ пролива Великая Салма, определены выделы, соответствующие по масштабному уровню ландшафтной фации.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад соискателя был определяющим.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список сокращений и список литературы, состоит из 148 страниц текста, 76 иллюстраций и 11 таблиц. Список литературных источников содержит 150 наименований.

Благодарности

Автор глубоко признательна и выражает благодарность своему научному руководителю Михаилу Юрьевичу Токареву, поддержка, наставления и советы которого помогают автору во всех сферах деятельности. Автор благодарит Александра Евменьевича Рыбалко за весомый вклад в образование автора, помощь в исследовании литологии и геологического строения района работ и пример во всем; Татьяну Юрьевну Репкину за продуктивную совместную работу в области геоморфологии; коллектив компании ООО «Сплит» за помощь в сборе полевых материалов; коллег из ООО «ЦАСД МГУ» за общность интересов, поддержку и терпение; сотрудников Беломорской биологической станции биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, особенно Артема Исаченко и Влада Козловского за совместную работу и расширение горизонтов научных компетенций; сотрудников кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета за обучение и доверие быть частью коллектива.

Отдельные слова благодарности автор адресует семье, где всегда могла найти поддержку и понимание.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, излагаются цель и задачи работы, указаны научная новизна, защищаемые

положения, практическая значимость работы, аргументируется степень достоверности и апробация результатов исследования, указан личный вклад.

Глава 1. Подводные ландшафты: история развития и современное состояние

Изучение и освоение природных ресурсов Мирового океана тесно связаны с ландшафтными исследованиями и картографированием подводных ландшафтов. История развития теоретических основ подводного ландшафтоведения и технологий исследования субаквальных ландшафтов связана в России с именами С.А. Зернова, К.М. Дерюгина, В.В. Докучаева, Л.С. Берга, С.В. Калесника, С.П. Хромова, В.Н. Кулецкого, Д.Г. Панова, А.Н. Пономарева, В.Н. Сукачева, В.Б. Сочавы, А.Г. Исаченко, К.М. Петрова, Н.А. Солнцева, А.А. Григорьева, Ф.Н. Милькова, В.М. Лымарева, Д.Е. Гершановича, В.В. Федорова, В.В. Преображенского В.А. Мануйлова, А.Л. Сорокина, Е.И. Игнатова, Н.Н. Митиной, В.Г. Папунова и др. (Пенно, 2014, Дорохов, 2018).

Применение геофизических, в первую очередь гидроакустических методов для картографирования подводных ландшафтов и изучения структуры донных сообществ началось уже в 1940-х годах. В 1970-х годах были сделаны попытки использовать для картирования грунтов эхолотные записи, опираясь на различие акустической отражательной способности валунно-галечных, песчаных и илистых донных отложений (Fish J.P. et al., 1990). Впервые работы по практическому применению гидролокации бокового обзора (ГЛБО) для характеристики площадного распространения литотипов донных отложений, а также в бентосных исследованиях были начаты и опубликованы в СССР в конце 1970-х годов. Были изданы атласы с изображением различных типов грунтов (Belderson et al., 1972; Рыбалко и др., 1989). Широкое применение гидролокация получила только с середины 1990-х годов (Илюшин и др., 2014).

Для успешного картографирования подводных ландшафтов требуется комплексный подход, методические подходы должны обеспечивать информацию о геоморфологии участка, геологическом строении и структуре бентосных сообществ. В главе описаны три основных типа дистанционных наблюдений, которые наиболее широко используют для картографирования подводных ландшафтов: многолучевое эхолотирование (МЛЭ), гидролокация бокового

обзора (ГЛБО), непрерывное сейсмоакустическое и/или акустическое профилирование (НСП и/или АПр), также рассмотрены дистанционное зондирование Земли и аэрофотосъемка.

Используемые в работе наименования природно-территориальных комплексов разного масштаба (ландшафты, местности, урочища, фации) и их площадь определяются в своде правил «Инженерно-экологические изыскания для строительства» (СП 502.1325800.2021, 2021).

Приведена классификация методических подходов в различных масштабах и стратегии комплексирования разнородной информации, рассмотрены практические примеры изучения подводных ландшафтов.

Глава 2. Геолого-геофизическая характеристика Кандалакшского залива Белого моря

Глава начинается с истории изучения Белого моря, в котором с 60-х годов XX века принимали участие сотрудники ИО АН, ИО РАН, ВСЕГЕИ, МГУ, ГИН РАН, «Архангельскгеологии» и ряда других организаций. Заметный вклад в изучение геологического строения Белого моря, в частности, Кандалакшского залива, внесли геолого-геофизические исследования, выполненные на базе Беломорской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (ББС МГУ) в рамках научно-образовательной морской практики геологического факультета МГУ. Материалы этих работ, в которых автор принимала непосредственное участие, послужили основой для настоящей диссертации.

Во второй главе даны общие характеристики объекта исследований диссертационной работы – Кандалакшского залива Белого моря. Описаны история геологического развития и сейсмо-геологическое строение четвертичных отложений. Обосновано, что на небольшом по площади участке полигона возможно отработать технологию картирования донных ландшафтов, характерных для гляциальных шельфов разных типов.

Основу Беломорского блока Балтийского щита (или Лапландско-Беломорского пояса), в пределах которого располагается Кандалакшский залив, составляют архейские и протерозойские глубокометаморфизованные кристаллические породы беломорской серии (Невеский и др., 1976). Осадочный покров на исследуемой территории представлен четвертичными отложениями, среди которых выделяют ледниковые, комплекс

последледниковых и морские отложения позднепоследледникового возраста (Спиридонов и др., 1980). Мощность четвертичных отложений очень изменчива и варьирует в пределах от нуля до сотен метров.

Современный рельеф района исследований имеет гетерогенное происхождение. Кандалакшский залив и прилегающие территории имеют структурно-тектоническую предопределенность (Балуев и др., 2012). В четвертичное время характер донной поверхности неоднократно изменялся в ледниковые периоды. Настоящий вид морского дна моделирован современными процессами.

Глава 3. Технология сбора и анализа гидроакустических данных для картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов

Разработанная технология включает сбор полевых материалов, методику и программное обеспечение для качественной и количественной интерпретации гидроакустических данных.

Идея предлагаемого автором метода сбора и количественного геостатистического анализа результатов мультиспектральных гидроакустических наблюдений заключается в расчете кинематических и динамических атрибутов данных МЛЭ, ГЛБО и АПр в различных частотных диапазонах и их кластеризации для выделения однородных по геолого-геоморфологическим компонентам ландшафтов различных масштабных уровней (Терёхина и др., 2018). Для получения представительных данных предлагается использовать программно-аппаратный гидроакустический комплекс (ПАК), позволяющий проводить исследования в различных диапазонах частот. По мнению автора, его параметры должны отвечать следующим требованиям (таблица 2).

Таблица 2. Требования к составу и параметрам ПАК

Модификации/ метод	Диапазон рабочих частот, кГц	Глубинность // разрешающая способность	Интервал возбуждения/ шаг приема/ база приема
МЛЭ/ эхолотирование	100–500	~0// от 1 x 1 до 2 x 2 м	0,1 –1 м или 0,05–0,5 сек/0 м/0 м
ГЛБО 1 – высокочастотный / гидролокация	700-1000	0,15-0,2см // ~1 м*	0,1-1 м или 0,05-0,5 сек/0 м/0 м

Модификации/ метод	Диапазон рабочих частот, кГц	Глубинность // разрешающая способность	Интервал возбуждения/ шаг приема/ база приема
ГЛБО 2 – среднечастотный / гидролокация	380-700	0,2-0,4см // 1-2 м*	0,1-1 м или 0,05-0,5 сек/0 м/0 м
ГЛБО 3 – низкочастотный / гидролокация	50-370	0,4-3 см // 1-2 м*	0,1-1 м или 0,05-0,5 сек/0 м/0 м
АПр / НСП	1,5-15	До 10-50м // 0,2-1м	0,1-1 м или 0,05-0,5 сек/0 м/0 м
ВЧ НСП – СУВР / МОВ ОГТ, МОВ ЦЛ (Т ₀)	0,25-2,5	До 10-50м // 0,2-1м	1-2 м или 0,5 сек / 1-2 м / 16–48 м
НЧ НСП – ССВР/ МОВ ОГТ, МОВ ЦЛ (Т ₀)	0,15-1,5	До 100–200 м // 1–5 м	2-4 м или 1-2 сек / 2-3,125 м / 32-150 м

* Достигается при скорости судна не более 4 узлов.

В этом разделе также подробно описана методика и программное обеспечение для анализа гидроакустических данных. Предлагается последовательность интерпретации материалов, полученных с помощью описанного выше ПАК. Представлена методика получения и геостатистической обработки атрибутов по данным гидролокации бокового обзора в трех частотных диапазонах.

Глава 4. Геолого-геоморфологические компоненты подводных ландшафтов Кандалакшского залива на примере залива Великая Салма

Данная глава является основной самостоятельной главой, где описываются материалы, методы исследования и их комплексный анализ. На примере типового участка по авторской технологии определяются геологическое строение, геоморфологические особенности и структура донных отложений. Проведена идентификация и картирование ландшафтных выделов масштабных уровней фаций, урочищ и местностей.

Базовый этап исследований был выполнен на полигоне «Пролив Великая Салма» в 2016 и 2021 годах, где при участии автора были спроектированы и проведены полевые работы следующими методами:

- непрерывное сейсмоакустическое профилирование (453 п. км);

- батиметрическая съемка (63 кв. км);
- гидролокация бокового обзора (трех частотный вариант) (296 п. км / 831 п. км / 125 п. км);
- геологический пробоотбор (90 точек);
- подводная фото- и видеосъемка (76 точек).

Дополнительные прямые наблюдения проводились в 2024 году. Таким образом, в районе исследований получены гидроакустические данные высокой плотности, заверенные прямыми наблюдениями (рисунок 1). Данные мультисоставных сейсмоакустических исследований были взяты из архивных материалов (Кубышкина и др., 2012; Сорокин и др., 2009; Токарев, 2016).

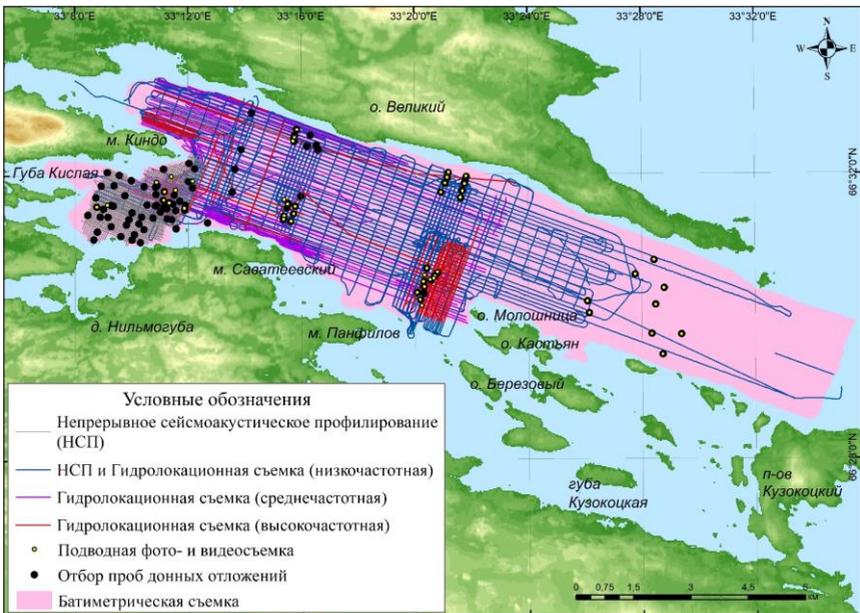


Рисунок 1. Карта фактического материала по комплексу гидроакустических методов, пробоотбора, подводных фото- и видеонаблюдений

В параграфе 4.1 о геологическом строении пролива Великая Салма приводится описание характерных сейсмоакустических разрезов и анализ карт кровли кристаллического фундамента, мощности моренных и постледниковых отложений (рисунок 2).

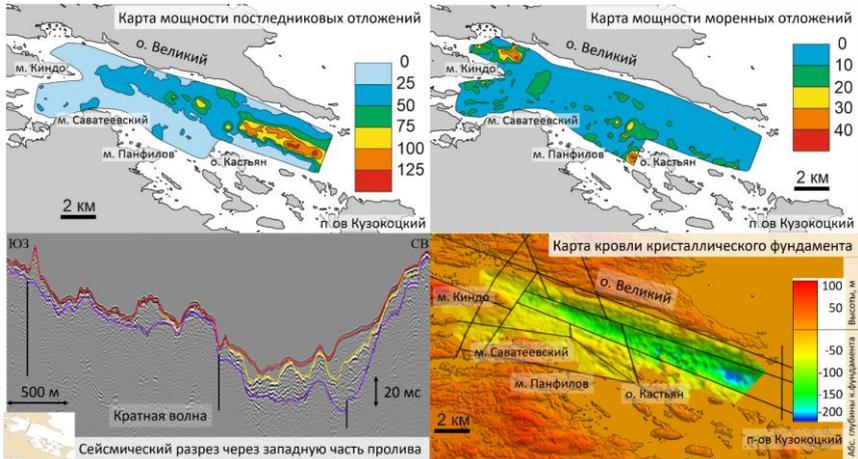


Рисунок 2. Результаты интерпретации данных сейсмоакустических наблюдений. Шкалы на картах справа в метрах

На большей части изученной площади кровля архейского комплекса залегает на глубине до 50 м, за исключением юго-восточной части пролива Великая Салма, где в устьевой части кровля погружается до глубины около 200 м. Поверхность кровли, как правило, сильно сглажена, а местами имеет блоковое строение. По резким изменениям в кровле фундамента и продолжению этих изменений в рельефе и очертании берегов были закартированы ключевые для ландшафтного картографирования разрывные нарушения. Основными являются разломы северо-западного простирания, которые образуют грабен пролива. Наблюдается несколько поднятых блоков, разделенных разломами более низкого порядка ССЗ-ЮЮВ простирания.

В плане ледниковый комплекс тяготеет преимущественно к более мелководным участкам. Морена с максимальной мощностью около 50 м обнаружена на севере от восточного окончания полуострова Киндо и на одном участке в мелководной юго-западной части пролива Великая Салма. В среднем мощность ледниковых отложений составляет 10–15 м. В подводной депрессии глубоководной части пролива Великая Салма наблюдаются наименьшие мощности морены или ее отсутствие.

В отличие от ледникового комплекса, минимальная мощность перекрывающих его более молодых отложений выделена на мелководных участках акватории (до 15–20 м), а максимальная (120–

130 м) наблюдается в осевой части подводной депрессии пролива. В глубоководной депрессии пролива Великая Салма и на ее склонах развиты отложения со сложной внутренней структурой различной мощности, генезис которых обусловлен, видимо, действием гравитационных процессов. Мощность этих отложений может достигать нескольких десятков метров, причем оползание отложений происходило в несколько этапов.

Параграф 4.2 посвящен рельефу пролива Великая Салма. По результатам многолучевого эхолотирования выделена грабенообразная депрессия и ее макросклоны. Анализ элементов мезорельефа и их экспертная качественная интерпретация позволяет выделить формы, определяющие морфологию ландшафтных фаций. Так, в пределах исследуемой площади можно идентифицировать 12 типов мезоэлементов и с учетом результатов сейсмоакустической интерпретации определить их генезис (рисунок 3).

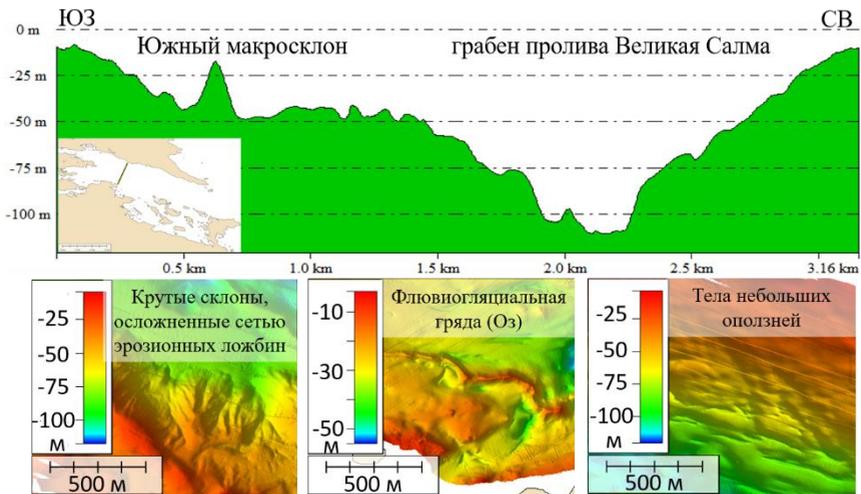


Рисунок 3. Профиль рельефа поперек пролива Великая Салма (сверху), элементы мезорельефа и их генезис (снизу)

В параграфе 4.3 описана качественная и геостатистическая интерпретация гидроакустических данных с целью определения структуры донных отложений. По данным донного пробоботбора, совместно с анализом данных НСП, ГЛБО, МЛЭ и учетом их количественного анализа была построена карта донных осадков.

В результате комплексного анализа данных геофизических наблюдений в проливе Великая Салма было определено шесть ландшафтных выделов ранга местностей (параграф 4.4). Основными признаками разделения служили схожесть тектоники и доледниковых геологических процессов. Таким образом, границы участков контролируются разрывными нарушениями северо-западного и северо-северо-западного простирания (рисунок 4).

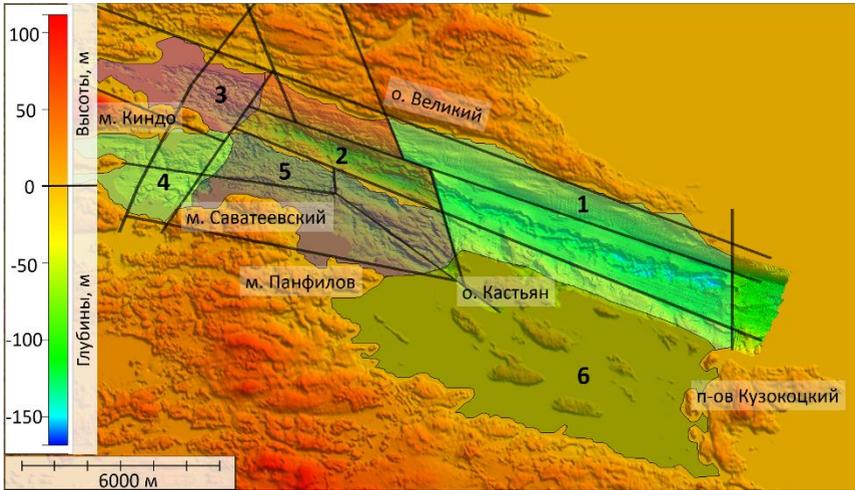


Рисунок 4. Карта ландшафтных выделов, соответствующих масштабному уровню местностей. Пронумерованные цветные зоны соответствуют выделенным местностям. Черным показаны области основных разрывных нарушений

Для выделения урочищ – ландшафтных выделов размером от 0,5–3 до 10–20 км², территориально и генетически связанных совокупностей фаций, необходимо было идентифицировать геолого-геоморфологические компоненты ранга фаций.

По мнению автора, в пределах пролива Великая Салма Кандалакшского залива по гидроакустическим и геологическим данным, заверенным фото- и видеонаблюдениями, выделяются 24 различия, соответствующие по масштабному уровню ландшафтной фации. Большинство идентифицированных выделов характеризуется специфичным мезорельефом, 12 различий относится к фациям склона. Для каждой фации в параграфе 4.5 описаны рельеф, слагающие ее осадки и преобладающий тип современных литодинамических процессов (рисунок 5).

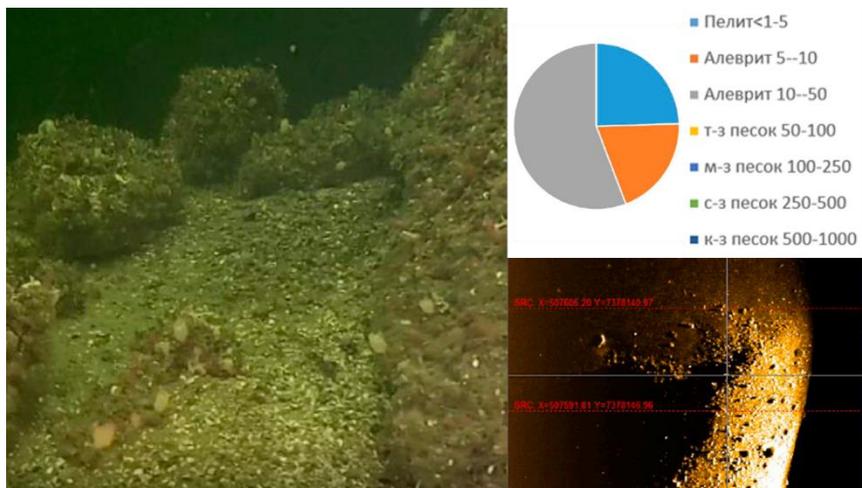


Рисунок 5. Пример идентификации фации 5 – аккумулятивно-денудационной холмистой равнины. Слева – фрагмент подводного видео справа сверху – фракционный состав, справа внизу – участок сонограммы ГЛБО

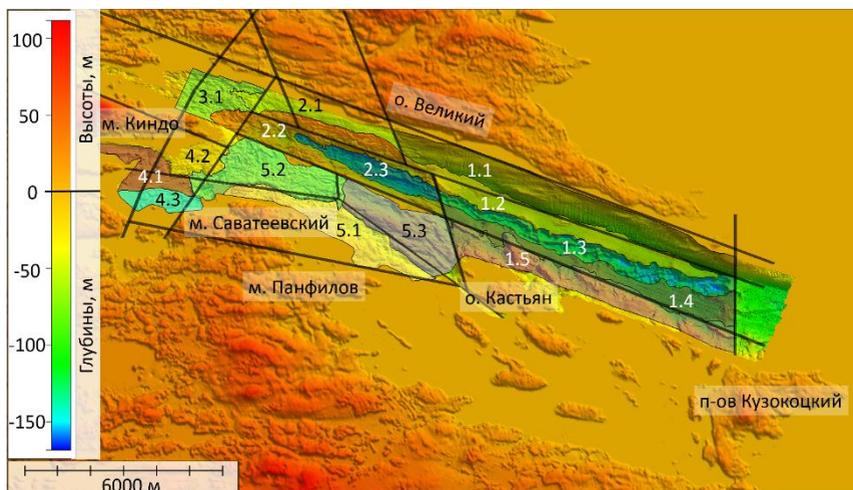


Рисунок 6. Карта урочищ пролива Великая Салма. Пронумерованные цветные зоны соответствуют выделенным местностям. Черным показаны области основных разрывных нарушений

В пределах выделенных местностей в параграфе 4.6 в соответствии с идентифицированными фациями качественный и

количественный анализ гидроакустических данных позволил выделить 15 районов ранга урочищ (рисунок 6, стр. 20). Границы выделов следует воспринимать как пограничные зоны с постепенно изменяющимися свойствами.

Заключение

В рамках выполнения диссертационной работы, направленной на картирование геолого-геоморфологических компонентов ландшафтных выделов различного масштабного уровня Кандалакшского залива Белого моря с использованием авторской технологии сбора и анализа гидроакустических данных, получены следующие результаты:

1. Проведен анализ существующих методик изучения подводных ландшафтов. Описаны три основных методических подхода к сбору и анализу информации в различных масштабах. Несмотря на то что в актуальном своде правил «Инженерно-экологические изыскания для строительства» (СП 502.1325800.2021, 2021) приводится определение природно-территориальных комплексов разного масштаба (ландшафтных выделов), методика таких исследований не описана, а технологии, связывающие наблюдения различных масштабных уровней, не разработаны.

2. Выполнен обзор результатов геолого-геофизических исследований Кандалакшского залива Белого моря с середины 1960-х годов до нашего времени. Описаны основные геологические и геоморфологические особенности района. Обоснован выбор полигона исследований.

3. Автором разработана технология сбора и анализа гидроакустических данных, включающая состав оптимального программно-аппаратного комплекса, методику сбора, граф и программные средства обработки и интерпретации, и обеспечивающая определение границ геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов.

4. В результате полевых наблюдений на тестовом полигоне «Пролив Великая Салма» в период с 2016 по 2024 год получен достаточный материал для апробации технологии и картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов, характерных для Кандалакшского залива Белого моря.

5. Проведена апробация авторской технологии в части комплексной интерпретации разнородных данных для картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов.

б. В соответствии с авторской технологией в проливе Великая Салма впервые выполнено крупномасштабное картирование для выделения геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов. На основе проведенных сейсмических наблюдений и эхолотирования были определены выделы масштабного уровня местностей, границы которых контролируются разрывными нарушениями двух направлений.

По данным гидроакустических наблюдений в пределах местностей пролива Великая Салма выделяются ландшафтные урочища, границы которых определены эндогенными и экзогенными процессами, связанными с тектоническим и ледниковым воздействием.

На основе авторской технологии по гидроакустическим данным с верификацией прямыми методами были определены геолого-геоморфологические компоненты ландшафтных выделов масштабного уровня фаций, сформированных совокупными действиями тектонических, ледниковых и современных морских аккумулятивно-денудационных процессов.

Основные направления развития научных исследований и технологии картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов, как и ландшафтов в целом, определяются необходимостью прогноза и оценки временных изменений абиотических компонентов и бентосных сообществ как в случае естественного развития, так и при возрастании антропогенной нагрузки при освоении арктических шельфов. Результаты проведенных исследований в Кандалакшском заливе могут послужить основой системы мониторинга изменений ландшафта как Белого моря, так и всего западно-арктического шельфа Российской Федерации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. Терёхина Я.Е., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Замотина З.С., Фрих-Хар А.Ю. Определение основных геолого-геоморфологических компонент подводных ландшафтов на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных (Кандалакшский залив, Белое море) // Геофизика. 2024. № 2. С. 58–

63. 0.38 п.л., авторский вклад 60%. DOI: 10.34926/geo.2024.62.53.010. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,53.

2. Репкина Т.Ю., Рыбалко А.Е., **Терёхина Я.Е.**, Михайлюкова П.Г., Середа И.И., Соловьева М.А., Потемка А.К., Токарев А.М., Токарев М.Ю., Исаченко А.И., Шабалин Н.В. Опыт крупномасштабного геоморфологического картографирования гляциальных шельфов по геофизическим данным (пролив Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря) // Океанология. 2022. Том 62. № 3. С. 451–465. 0.31 п.л., авторский вклад 15%. DOI 10.31857/S003015742203008X. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 1,811.

3. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Замотина З.С., **Терёхина Я.Е.** Роль ледникового и литодинамического факторов в формировании осадочного чехла пролива Великая Салма (Белое море). // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2022. № 1. С. 62–70. 0,56 п.л., авторский вклад 15%. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298.

Starovoitov A.V., Tokarev M.Yu, Zamotina Z.S., **Terekhina Ya.E.** The Role of Glacial and Lithodynamic Factors in the Sedimentary Cover Formation in the Velikaya Salma Strait (White Sea) // Moscow University Geology Bulletin. 2022. 77. 2. P. 220–228. 0,56 п.л., авторский вклад 15%. DOI 10.3103/S0145875217030061. SJR 0.238

4. **Терёхина Я.Е.**, Токарев М.Ю., Галаев В.Е. Геостатистический анализ гидроакустических наблюдений в проливе Великая Салма // Геофизика. 2021. Спецвыпуск. С. 35–39. 0.31 п.л., авторский вклад 70%. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,53.

5. Ампилов Ю.П., **Терёхина Я.Е.**, Токарев М.Ю. Прикладные аспекты сейсмических и гидроакустических исследований на шельфе в различных частотных диапазонах // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Том 18. № 1. С. 33-49. 1,06 п.л., авторский вклад 33%. DOI: 10.21455/GPB2019.1. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,883.

Ampilov Y.P., **Terekhina Ya.E.**, Tokarev M.Yu. Applied Aspects of Different Frequency Bands of Seismic and Water Acoustic Investigations on the Shelf // Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. 55. 7. P. 705–720. 1 п.л., авторский вклад 33%. DOI: 10.1134/S0001433819070028. SJR 0.247.

6. **Терёхина Я.Е.**, Токарев М.Ю. Количественный анализ гидроакустических данных для картографирования абиотических

компонент подводных ландшафтов // Геофизика. 2018. № 3. С. 154–160. 0,38 п.л., авторский вклад 80%. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,53.

7. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.**, Козупица Н.А. Строение осадочного чехла Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустики // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2018. № 2. С. 81–92. 0,75 п.л., авторский вклад 15%. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298.

Starovoitov A.V., Tokarev M.Yu., **Terekhina Ya.E.**, Kozupitsa N.A. The Structure of the Sedimentary Cover of the Kandalaksha Gulf, White Sea, from Seismoacoustic Data // Moscow University Geology Bulletin. 2018. 73. 3. P. 209–214. 0,75 п.л., авторский вклад 15%. DOI: 10.3103/S0145875218030092. SJR 0.238.

8. **Терёхина Я.Е.**, Токарев М.Ю., Шевченко Н.В., Козупица Н.А. Происхождение подводных поднятий губы Ругозерская и пролива Великая Салма (Кандалакшский залив) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 2. С. 51–56. 0,38 п.л., авторский вклад 60%. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298.

Terekhina Ya.E., Tokarev M.Yu., Shevchenko N.V., Kozupitsa N.A. Subsea uplifts origin of the Rugozerskaya bay and the Great Salma channel (Kandalaksha Bay) // Moscow University Geology Bulletin. 2017. 72. 3. P. 209–214. 0,38 п.л., авторский вклад 60%. DOI: 10.3103/S0145875217030061. SJR 0.238.

9. Isachenko Artem, **Gubanova Yana**, Tzetlin Alexander, Mokievsky Vadim. High-resolution habitat mapping on mud fields: New approach to quantitative mapping of Ocean quahog // Marine Environmental Research. 2014. 102. P. 1-7. 0,38 п.л., авторский вклад 10%. DOI: 10.1016/j.marenvres.2014.05.005. JIF 2022: 3.

Рецензируемая научная монография

10. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е. Атлас по интерпретации геофизических данных для морской практики на Белом море. Учебное пособие // 2018. КДУ «Университетская книга» Москва. ISBN 978-5-91304-810-3. 110 с. 6,88 п.л., авторский вклад 25%.