

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*

**Терёхина Яна Евгеньевна**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки)

Научный руководитель  
кандидат технических наук  
Токарев Михаил Юрьевич

Москва – 2024

## Оглавление

Введение.....	4
Глава. 1 Подводные ландшафты: история развития и современное состояние .....	12
1.1 История развития исследований подводных ландшафтов. ....	13
1.2 Дистанционные методы изучения геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов.....	15
1.3 Современные методические подходы к анализу гидроакустических данных для изучения геолого-геоморфологических компонентов подводного ландшафта .....	22
Глава. 2 Геолого-геофизическая характеристика Кандалакшского залива Белого моря .....	33
2.1 История исследований .....	33
2.2 Геологическое строение.....	36
2.3 Рельеф дна .....	42
Глава. 3 Технология картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов по комплексу гидроакустических методов.....	45
3.1 Методика сбора гидроакустических данных. ....	45
3.2 Методика и программное обеспечение для анализа гидроакустических данных .....	54
Глава. 4 Геолого-геоморфологические компоненты подводных ландшафтов Кандалакшского залива на примере пролива Великая Салма.....	63
4.1 Материалы и методы.....	65
4.2 Геологическое строение по данным мультислотных сейсмоакустических наблюдений 74	74
4.3 Геоморфологические элементы макро- и мезорельефа по данным МЛЭ. ....	80
4.4 Структура донных отложений по гидроакустическим данным и результатам пробоотбора.....	83
4.5 Комплексирование результатов исследований для определения геолого- геоморфологических компонентов подводных ландшафтов .....	100
4.5.1 Идентификация и районирование местностей пролива Великая Салма .....	102
4.5.2 Идентификация фаций пролива Великая Салма.....	108
4.5.3 Идентификация и районирование урочищ пролива Великая Салма .....	115
Заключение .....	122
Список сокращений .....	126

Список иллюстраций .....	128
Список таблиц .....	133
Список литературы .....	134
Свидетельства о регистрации программ .....	147
Интернет-источники .....	147

## Введение

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) (Рисунок 1).

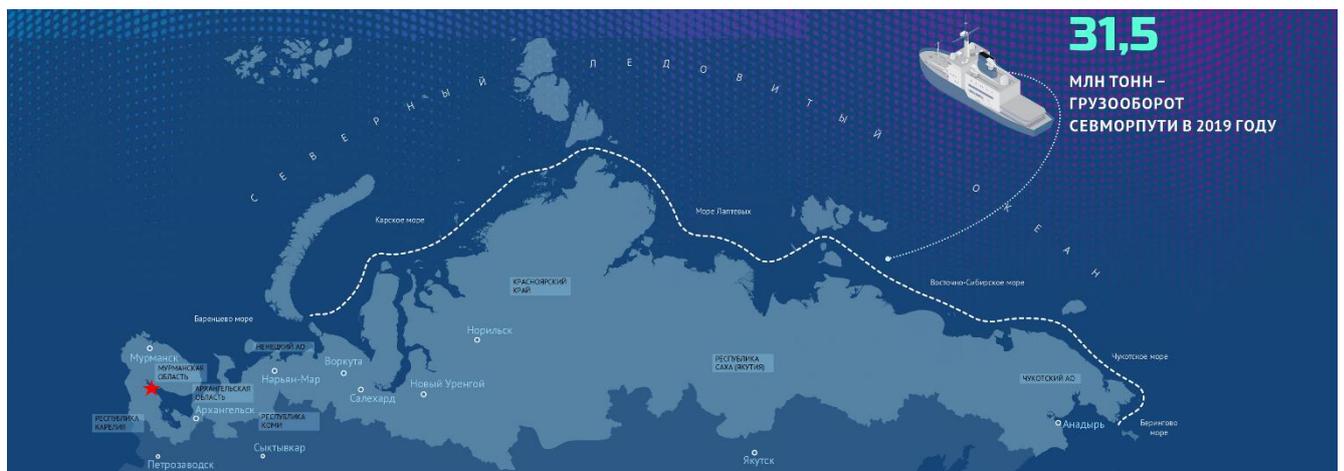


Рисунок 1. Карта Арктической зоны Российской Федерации (светло синяя область). Пунктиром нанесен Северный морской путь. Звездочкой обозначен район исследования диссертационной работы (по материалам сайта <https://admnoyabrsk.ru/>).

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 исследований**

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. Потребность в использовании гидроакустических методов диктуется рядом объективных причин:

- необходимостью большого объема прямых наблюдений при равномерной сетке станций;
- длительным сроком сбора данных по отбору проб и их анализу;
- проблемой генерализации данных о пространственном распределении и составе геолого-геоморфологических компонент.

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 биологические, экологические, геологические, гидрографические, океанографические и геофизические данные, что создало реальные предпосылки для осуществления комплексного анализа многопараметрических данных. (Brown C. et al., 2011).

Основными объектами эколого-ландшафтной съемки являются природно-территориальные комплексы разного масштаба (таксономического ранга): ландшафты, местности, урочища, фации (СП 502.1325800.2021, 2021).

Методические подходы к анализу информации 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; Мокиевский, 2009; Мокиевский, 2012; Мокиевский и др., 2015; Токарев, 2002; Орлова, Рябчук 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 систематически изучается геофизическими методами с середины 60-х годов. Детальные исследования пролива Великая Салма начались в 2001 году, и ежегодно проводятся в рамках научно-образовательной морской практики Геологического факультета МГУ. За это время был накоплен колоссальный объем материала сейсмоакустических и гидроакустических исследований – тысячи погонных километров съемки и сотен точек пробоотбора и видеонаблюдений (Девдариани, 1985; Мокиевский В.О., 2006; Сорокин,

Старовойтов и Токарев, 2009; Старовойтов и др., 2018аб; Рыбалко, 2024), необходимого для картографирования подводных ландшафтов, в соответствии с методикой, сочетающей дистанционные и прямые наблюдения в одном исследовании.

**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 является картографирование подводных ландшафтов. Предметом исследования является технология гидроакустических исследований и определение геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов участков Кандалакшского залива Белого моря.

### **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 2021 гг. Кроме того, под руководством автора были обработаны и проинтерпретированы результаты полевых работ по Карскому морю. Основными методами для получения данных были многолучевое эхолотирование, гидролокация бокового обзора и сейсмоакустические исследования.

Обработка и анализ данных гидролокации бокового обзора и многолучевого эхолотирования проведена в авторском программном обеспечении САМГГИ 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.

#### **Защищаемые положения:**

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 (ЕАГО, 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.

### **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.

## Глава. 1      Подводные ландшафты: история развития и современное состояние

Еще в середине 80-х гг. прошлого века Д.Е. Гершанович (Гершанович и др., 1985) отмечал, что сфера применения результатов морских ландшафтных исследований и подробных ландшафтных карт морского дна весьма широка и охватывает все отрасли хозяйства, связанные с использованием океана.

В литературе последних лет указаны следующие сферы использования карт подводных ландшафтов:

- составление кадастра подводных ландшафтов с целью комплексного управления и рационального морского природопользования (Brown et al., 2012);
- оценка состояния среды и разработка карты уязвимости донных ландшафтов к техногенным нагрузкам (Rende et al., 2015);
- обеспечение эколого-ландшафтного мониторинга и, в частности, мониторинга биологического разнообразия (Арзамасцев и др., 2012; Жариков и др., 2015; Маркевич и др., 2015; Rende et al., 2015);
- обоснование размещения особо охраняемых природных акваторий (ООПА) (Панкеева и др., 2014; Чуприна, 2010, Дорохов, 2018);
- выработка рекомендаций и приемов рационального использования биологических ресурсов прибрежных районов (Пенно, 2014);
- определение запасов промысловых видов водорослей, кормовой базы ценных промысловых видов рыб и организмов инфауны (Siaulys et al., 2012);
- рыбный промысел (Гуков, 2015; Исхаков и др., 2015; Мироненко и др., 2014; Brown et al., 2012);
- оценка и принятие решений относительно выбора площадки нового строительства или варианта трассы подводного трубопровода;
- оценка объема и массы биообрастаний трубопроводов;
- разработка раздела «Охраны окружающей среды» в проектной документации строительства морских сооружений;
- рекреационные услуги (дайвинг) (Galparsoro et al., 2014).

## 1.1 История развития исследований подводных ландшафтов

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).

Большой вклад в решение одной из ключевых проблем рассматриваемого научного направления - классификации подводных ландшафтов - в последние годы внесли Б.В. Преображенский, В.В. Жариков, Л.В. Дубейковский, Н.Н. Митина, Е.В. Чуприна (Митина, Чуприна, 2012; Преображенский и др., 2000). В качестве основных классификационных признаков компонентов ландшафтов выбраны следующие показатели - тип береговой линии, рельеф дна, гранулометрический состав грунта, гидрологические, гидродинамические и гидрохимические параметры водных масс, фито- и зоопланктон, бентосные сообщества, распределение ценных промысловых видов рыб (осетровые) и беспозвоночных, основные загрязняющие вещества.

Параллельно с развитием теоретической базы подводного ландшафтоведения, идет быстрый процесс развития и внедрения в практику морских научных исследований новых методов и средств. Авторами первого атласа дешифрирования подводных ландшафтов, который был составлен и опубликован в 1976 году, стали Гурьева З.И., Петров К.М. и Шарков В.В. (Гурьева и др., 1976). Краткая история развития методов и техники изучения донных сообществ (аэрофото- и спутниковая съемка, геофизические (гидролокационные) методы, подводные наблюдения с использованием фото- и видеосъемки) отражена в работах В.А. Мануйлова (Мануйлов, 1990), Б.В. Преображенского, В.В. Жарикова, Л.В. Дубейского (Преображенский и др., 2000), В.О. Мокиевского (Мокиевский, 2009; Мокиевский, 2012), Н.А. Римского-Корсакова (Римский-Корсаков, 2011), Д.Г. Илюшина, А.И. Исаченко, Н.В. Шабалина, В.О. Мокиевского (Илюшин, 2014).

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 70-х годах были сделаны попытки использовать для картирования грунтов эхолотные записи, опираясь на различие акустической отражательной способности валунно-галечных, песчаных и илистых донных отложений (Токарев и др., 2002) К этому же времени относятся и первые опыты комплексного физико-географического районирования морей и океанов. Первые работы по практическому применению гидролокации бокового обзора (ГЛБО) для характеристики площадного распространения литотипов донных отложений, а также в бентосных исследованиях были начаты в СССР в конце 1970-х годов. Были изданы атласы с изображением различных типов грунтов (Belderson et al., 1972; Рыбалко и др., 1989), но широкое применение они получили только с середины 1990-х годов. По мере совершенствования одного из основных методов подводного ландшафтоведения – гидролокации бокового обзора «стало возможным получать сонограммы практически фотографического качества» (Илюшин и др., 2014).

Существенный прогресс в области гидролокации морского дна был достигнут в этот период в связи с задачами ВМФ. Большой вклад в развитие технологий обследования морского дна, в т. ч. гидролокационными методами, внесли специалисты Гидрографической службы ВМФ, Института геодезии и картографии, Южморгеологии, геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Института геологии и геофизики ДВО РАН и других организаций.

Для глубоководных исследований и поисковых работ в Лаборатории гидролокации дна (ЛГД) ИО РАН был создан ряд гидролокационных приборов, подводных аппаратов, комплексов и методик. Морские геофизики ИО РАН одни из первых выполнили геоморфологические исследования с использованием ГЛБО на Белом море в 1974 г.

В начале 1990-х годов актуальным стало решение методами гидроакустики прикладных задач на шельфе. В связи с освоением углеводородных ресурсов выполняются инженерно-геологические, инженерно-гидрографические и поисковые работы на мелководье, мониторинг подводных потенциально опасных объектов, исследования русловых процессов, осложняющих прибрежную геоэкологическую обстановку (Римский-Корсаков, Пронин, 2010; Римский-Корсаков, 2011).

Появление в середине последнего десятилетия XX века систем спутникового позиционирования GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия) и цифровой записи акустических сигналов, а также новых компьютерных программ для обработки данных позволило использовать ГЛБО для широкого круга задач на акваториях.

Активно ведутся работы по картографированию природных объектов и за рубежом (Жариков, 2008). В значительной степени они были инициированы Конвенцией по

биоразнообразие и соответствующими национальными директивами (Россия подписала Конвенцию в 2003 г.). Возникнув как приложение к локальным и региональным съемкам мелководий морей для систематизации условий среды и ассоциированных комплексов морских организмов, они на сегодняшний день сформировались в самостоятельную область исследований – картографирование морских местообитаний (Marine Habitat Mapping). К концу 90-х гг. на основе материалов, полученных в ходе картографирования береговой зоны Британии и Ирландии и экспертных оценок побережья Западной Европы (Connor et al., 2004; Connor et al., 1997) была разработана первая классификация местообитаний и биотопов морского дна (MNCR-BioMar). В настоящее время она используется как часть общеевропейской информационной системы EUNIS (European Nature Information System). Позже, работы по картографированию и созданию классификации морских местообитаний начались в США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии и других странах (Ball et al., 2006; Madden, Dennis, Grossman, 2004; Madden et al., 2004).

Новый этап развития рассматриваемой науки характеризуется появлением новых научных направлений и дисциплин, разработкой и применением новых методов в исследовании и картографировании морских ландшафтов, широким использованием методов математического моделирования, цифрового моделирования рельефа и ГИС моделирования донных ландшафтов.

Таким образом, в настоящее время для изучения различных компонентов подводных ландшафтов широко используются, помимо средств традиционных океанографических исследований и фото- видеосъемки, различные дистанционные методы:

- дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в вариантах спутниковых или аэронаблюдений
- непрерывное сейсмоакустическое и/или акустическое профилирование (НСП и/или АПр) в различных частотных диапазонах,
- гидролокация бокового и кругового обзора (ГЛБО и ГЛКО),
- многолучевое эхолотирование (МЛЭ) с или без регистрации величины обратного рассеяния.

## **1.2 Дистанционные методы изучения геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов**

Согласно статье Брауна, существует три основных типа дистанционных наблюдений, которые наиболее широко используют для картографирования подводных ландшафтов: непрерывное сейсмоакустическое профилирование, гидролокация бокового обзора и

многолучевое эхолотирование (Brown et al., 2012). Для исследования объектов в толще донных осадков применяются высокочастотные акустические методы. Для исследования мезорельефа дна и мезомасштабных подводных объектов, используются эхолоты, а для изучения микрорельефа дна ГЛБО. (Римский-Корсаков, 2011).

Современные дистанционные методы дают непрерывную пространственную информацию о величинах отражательной способности, обратного рассеяния или их комбинации, рельефе морского дна, структуры и свойств донных отложений. Расстояние между точками измерений у дистанционных методов, как правило, на два-три порядка меньше расстояние между точками геологических, гидрометеорологических или биологических наблюдений. Разрешение, с которым собираются данные, зависит от спецификации программно-аппаратного комплекса и методики съемки, но, вообще говоря, их можно использовать для изучения объектов размером от десятков сантиметров до десятков метров. Наиболее детально проблема оптимального разрешения съемки при использовании различных методов дистанционного и прямых исследований донных ландшафтов освещена в работах В.О. Мокиевского с соавторами (Мокиевский и др., 2015; Мокиевский и др., 2011). В таблице, заимствованной из работы Мокиевский и др., 2015, представлены данные по рассматриваемому вопросу.

Таблица 1. Сравнение дистанционных и прямых методов в исследовании донных ландшафтов (Мокиевский и др., 2015)

Виды методов	Скорость, км <sup>2</sup> /час	Горизонтальное разрешение, м							Комментарии
		1000	100	10	1	0,1	0,01	0,001	
Спутниковая съемка	Больше 100		•	•	•				Требует определенной квалификации от дешифровщика и иногда контрольной заверочной работы на местности
Аэрофотосъемка	Больше 10			•	•				
Многолучевой эхолот	Около 5				•				Создает точный 3D рельеф, площадная съемка хуже чем ГЛБО
Гидролокация бокового обзора	Около 3,5					•			Высокоразрешающая площадная съемка
Акустический профилограф	Меньше 1				•				Работает по профилю – не площадная съемка
Видеосъемка	Около 0,2					•			Видеосъемка с носителя – буксируемые камеры, ROV

<b>Фотосъемка</b>	Около 0,1					•	•	•	Зависит от методики проведения съемки
<b>Количественный пробоотбор</b>	Около 0,003						•		Дночерпатель; Бокскорер; Мультикорер.

Рассмотрим возможности и ограничения дистанционных методов для определения компонентов подводных ландшафтов.

**Непрерывное сейсмоакустическое и акустическое профилирование профилирование (НСП и АПр)** используют для изучения свойств дна и геологического строения поддонных отложений. В зависимости от решаемой задачи применяются различные системы для производства сейсмоакустического профилирования. Обычно перед АП ставится задача изучения верхних 10-50 м осадочной толщи с высоким разрешением (от 0.2 до 1 м), а непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) применяется для изучения первых сотен метров верхней части геологического разреза с разрешением 1-5 м. (СП 504.1325800.2021, 2021)

В методе НСП измерительная установка состоит из одного источника (группы источников) и одного приемника (группы приемников), расположенных так, чтобы расстоянием между ними можно было пренебречь по сравнению с глубиной исследований, иначе говоря, считать их совмещенными в пространстве. В сущности, метод НСП - модификация сейсмических наблюдений метода отраженных волн. Возбуждение и регистрация упругих колебаний производятся через такие интервалы времени, чтобы получать практически непрерывную запись (Шалаева, Старовойтов, Токарев, 2024). Геологическое строение и фациальный состав осадков определяют кинематические и динамические особенности регистрируемого волнового поля.

Геологическое строение чрезвычайно значимо при определении таких масштабных уровней ландшафтных выделов, как урочища и местности. Для картирования особенностей рельефа и смены фациального состава придонных отложений возможно разбиение на классы по форме донного импульса (Gubanova, 2012).

**Многочувствительное эхолотирование (МЛЭ).** Геоморфологические элементы находят свое отражение в рельефе дна и могут быть идентифицированы при проведении многочувствительного эхолотирования (Рисунок 2). Современные средства гидроакустики совместно с гидрографическим программным обеспечением позволяют получать качественно новую информацию с подробностью около 2 м (<https://furuno.ru/rybopoiskovoe-oborudovanie/wassp-mnogoluchevye-ehkholoty/>).

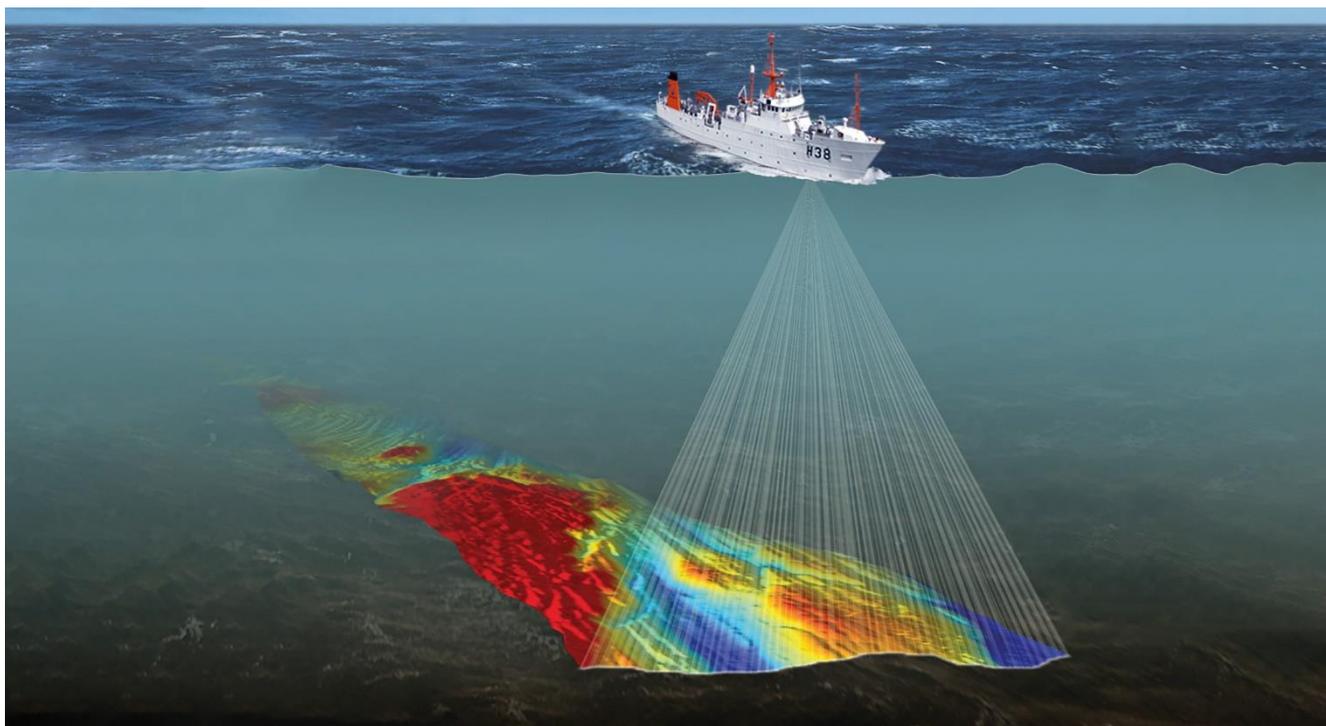


Рисунок 2. Иллюстрация процесса съемки многолучевым эхолотом (<https://www.marinha.mil.br/emgepron/en-us/node/223>)

Передающая антенна многолучевого эхолота озвучивает узкую полоску на поверхности дна направленную перпендикулярно к линии движения носителя антенны эхолота, в то время как приемная антенна формирует несколько (до 256) на каждый борт узких полосок, направленных вдоль линии движения носителя антенн эхолота. За счет пересечения озвученных поверхностей образуются суммарные лучи. Измерение глубины производится отдельно по каждому лучу по следующему алгоритму: в процессе съемки производится измерение угла отклонения каждого луча от вертикали и время распространения акустического сигнала по каждому лучу до дна и обратно. Далее, используя простые геометрические соотношения прямоугольного треугольника, рассчитывается глубина (вертикальный катет) по каждому лучу, зная длину гипотенузы и угол при вершине угла (<http://incseatech.ocean.ru/>).

Использование МЛЭ для картографирования подводных ландшафтов позволяет изучать морфометрические параметры рельефа, определяющие масштабные уровни ландшафтов (Таблица 2).

Картирование геоморфологического компонента подводных ландшафтов осуществляется с помощью многолучевого эхолотирования стандартным оборудованием и методиками (СП 504.1325800.2021, 2021, ГОСТ Р 58743-2019, 2020).

Таблица 2. Морфометрические характеристики рельефа шельфа (Никифоров, 2006)

Морфометрические группы рельефа	Структурно-геоморфологическая принадлежность	Размер
Мегарельеф	Шельф в целом, как крупнейший структурный элемент в планетарном плане	Ширина - от берега до бровки - тысяча км и более, перепад высот, как правило, около 200 м. В Баренцевом море, учитывая своеобразие структурного строения - до 400 м и более
Макрорельеф	Протяженные равнины, крупные структурные поднятия и депрессии, как правило, структурно обусловленные (Адмиралтейский вал, Южно-Новоземельский желоб и т.д.)	Протяженность – сотни км
Мезорельеф	Структурные и экзогенные формы рельефа формирование и развитие которых связано с особенностями палеогеографии или проявления современных процессов, а также неотектоники (затопленные бары, моренные валы, горсты, грабены и пр.)	Протяженность, как правило, до 100 км. Перепад высот – десятки метров.
Микрорельеф	Экзогенный рельеф, связанный с проявлением современных процессов (знаки ряби, биотурбационные признаки и т.д.)	Относительная высота (глубина) – как правило, до метра

**Гидролокация бокового обзора.** ГЛБО, первоначально разработанная для поиска военных объектов, впоследствии применялась для изучения рельефа, поиска полей железно-марганцевых конкреций, археологических объектов, оценки типа донных отложений, для рыбопромысловых целей, а также при инженерно-геологических и экологических изысканиях.

ГЛБО - геофизический метод, позволяющий получать объективную и достоверную площадную информацию о рельефе морского дна и гранулометрическом составе донных осадков (Неевин и др., 2015). Достоинством метода является возможность получения данных в удобном для дешифрирования и геологической интерпретации формате.

Типы донных отложений, различающиеся по грансоставу и структуре, отличаются интенсивностью обратного рассеяния и ее зависимостью от угла падения, поэтому перед гидролокацией бокового обзора стоят, как стандартные задачи:

- Определение однородных областей, характеризующихся различными типами осадков
- Определение микрорельефа поверхности
- Выделение отдельных объектов,

ГЛБО - эффективный метод и для мониторинговых исследований. При повторных съемках морского дна изучаются изменения морфологии, динамика и закономерности лито- и морфодинамических процессов, а также интенсивность техногенного воздействия на подводные ландшафты (Петухов и др., 2011).

За рубежом ГЛБО также применялось для картирования газопроявлений у балтийского побережья Германии и донных сообществ на разнотипных литологических субстратах (Мокиевский и др., 2011). Приведены также примеры успешного распознавания биологических сообществ на визуально однородном грунте или на участках дна, сложенных осадками, слабо различающихся по акустической плотности.

Использование ГЛБО для картографирования подводных ландшафтов основывается на следующих закономерностях:

- имеется достаточно тесная связь между типом осадков (литофациями) и составом донного населения;
- на сонограммах латеральные границы современных литофаций, различающихся по гранулометрическому составу могут быть достаточно надежно определены;
- отраженный акустический сигнал характеризует не только тип осадков, но и состав донных сообществ, поскольку различные виды донных организмов и результаты их жизнедеятельности существенно влияют на микрорельеф поверхности осадка, меняя его акустические характеристики;
- На разных частотах ГЛБО характеризует тонких слои под поверхностью дна различной мощности (первые 5 см)

Помимо гидроакустических данных используют дистанционное зондирование Земли в вариантах спутниковых или аэробнаблюдений.

**Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ).** Детальный обзор достижений первого десятилетия 21 в. в области использования аэрокосмической съемки в гидробиологических и геофизических исследованиях представлен в работе В.И. Горного, А.А. Тронина (Горный, Тронин, 2012) в Методическом пособии, подготовленном Всемирным фондом дикой природы России (WWF России) (Лабутина, Балдина, 2011). Основное ограничение для применения рассматриваемого метода - мутность воды. Именно этот параметр обуславливает глубину, до которой возможно проведение аэрокосмической съемки. В частности, в относительно

прозрачных водах Средиземного моря было проведено картирование полей морских трав *Pocidonia oceanica* и *Cymodocea nodosa* по спектрально-зональным снимкам среднего разрешения спутников серии SPOT на глубинах до 10 м, а особенности рельефа были изучены до 15-метровой изобаты. Для картирования покрытия фитобентоса также используется и цветная аэрофотосъемка, особенно на глубинах до 5 м. Анализ снимков с мультиспектрального сенсора высокого пространственного разрешения (2,4 м) QuickBird и гиперспектрального сенсора среднего разрешения (30 м) Hyperion и сравнение полученных материалов с данными полевых исследований «in situ» показали, что для картирования покрытия макроводорослей мультиспектральные снимки высокого разрешения предпочтительнее гиперспектральных снимков среднего разрешения. Батиметрические измерения по снимкам QuickBird на мелководье эстонского побережья Балтийского моря до изобаты 3 м сопоставимы с полевыми измерениями эхолотом. Отмечается, что при использовании аэрокосмической съемки в гидробиологических исследованиях наибольшие перспективы имеет зондирование морского дна в видимой части спектра.

**Аэрофотосъемка** представляет собой фотографирование определённой территории с высоты от сотен метров до нескольких километров при помощи аэрофотоаппарата, установленного на самолёте, вертолёте, дирижабле или беспилотном летательном аппарате.

Аэрофотосъемка морских мелководий позволяет получить достоверное изображение дна мелководья на больших площадях – до нескольких десятков и даже сотен квадратных километров – за короткое время, исчисляемое несколькими часами. Масштабы аэрофотоснимков (АФС), как правило, крупные – 1:3000 – 1:10000; разрешение аэрофотоизображений – первые сантиметры на точку. Аэрофотосъемка как бы снимает покров воды. В случае получения хорошего аэрофотоизображения мелководья исследователь может непосредственно на аэрофотоснимках опознавать подводные объекты и прослеживать их площадное распространение на морском дне, выявлять закономерности пространственного положения донных ландшафтов и их компонентов. В частности, на качественных аэрофотоснимках хорошо выявляются микроформы рельефа, некоторые типы донных осадков, водорослевый покров (Блинова и др., 2005).

### 1.3 Современные методические подходы к анализу гидроакустических данных для изучения геолого-геоморфологических компонентов подводного ландшафта

В отечественной практике долгое время существовал один нормативный документ федерального значения по инженерным изысканиям на шельфе - СП 11-114-2004, но он не включал инженерно-экологические изыскания и не содержал специальных требований к изучению подводных ландшафтов (СП 11-114-2004, 2004). В 2021 году были разработаны и утверждены своды правил СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования» и СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства». Эти нормативные документы определяют общие требования при проектировании водных объектов, в том числе морских нефтегазопромысловых сооружений. В новом своде правил СП 504.1325800.2021 определены методы, средства получения информации и их анализ для разных задач в рамках различных изысканий. В части экологических изысканий прописан анализ подводных ландшафтов, а их исследование возможно только при применении комплексных инженерно-геофизических, гидрографических, геологических методов.

Масштаб картирования территориального моря, внутренних морских вод и континентального шельфа при изысканиях для целей территориального планирования следует проводить в масштабах 1:50 000-1:10 000, при стадии архитектурно-строительного проектирования - в масштабах 1:5 000-1:2 000 (СП 504. 1325800.2021, 2021).

Согласно СП 502.1325800.2021 основными объектами эколого-ландшафтной съемки являются природно-территориальные комплексы разного таксономического ранга: ландшафты, местности, урочища, фации. Масштабные уровни ландшафтов (ранги) в зависимости от площади и масштаба картирования представлены в таблице (Таблица 3).

Таблица 3. Масштабные уровни ландшафтов (СП 502.1325800.2021, 2021)

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

Продолжая рассуждения о площади и подробности исследований необходимо отметить, что методические подходы к анализу информации в различных масштабах отличаются:

- Использование дистанционных данных (аэрофотосъемка, спутниковые данные, ГЛБО) увеличивает размер выдела до местностей и ландшафтов (Гурьева и др., 1976).
- 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; Мокиевский, 2009; Мокиевский, 2012; Мокиевский и др., 2015; Токарев, 2002; Орлова, Рябчук и др., 2014; Дорохов, 2018;) в одном исследовании позволяет определять ландшафтные выделы масштабных уровней местностей, урочищ и фаций. Автор считает себя причастной к этой школе изучения подводных ландшафтов.

Методические подходы различаются по стратегии комплексирования разнородной информации, на основе которой производится картографирование подводных ландшафтов. Согласно работам зарубежных исследователей (Ferrier et al., 2006, Brown et al., 2012) существует три основные стратегии (Рисунок 3).

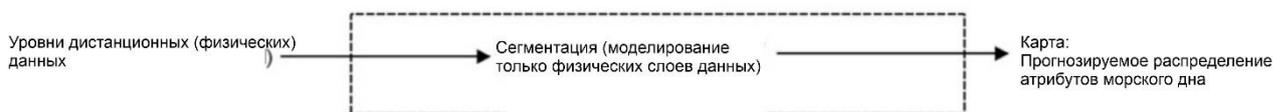
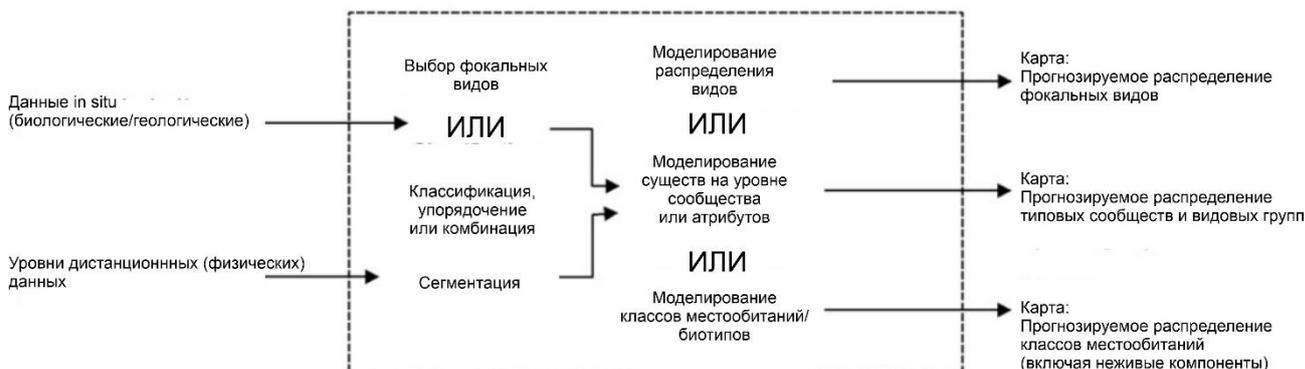
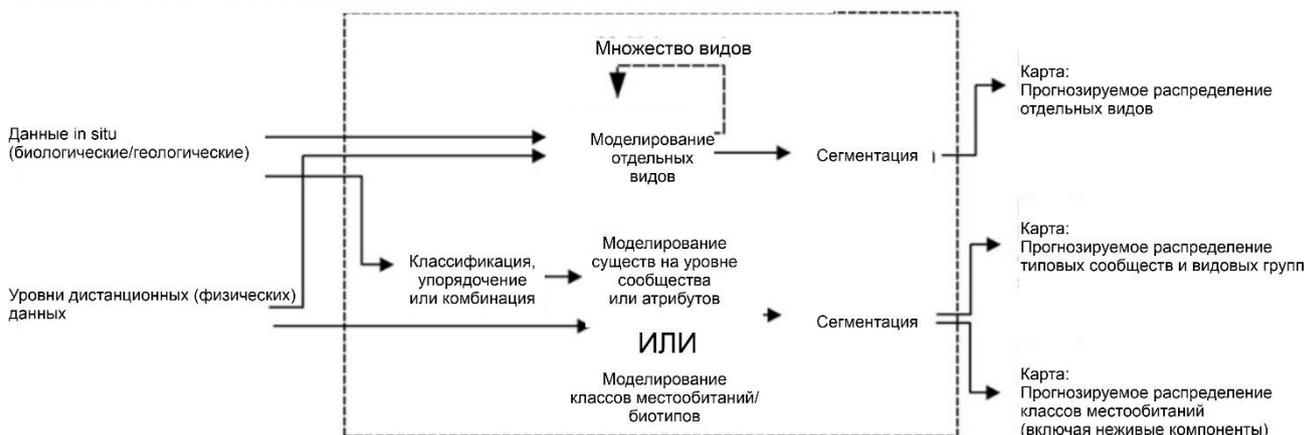
**Стратегия 1: Только неживые компоненты (без контроля)****Стратегия 2: Сначала сбор, затем предсказание СВЕРХУ ВНИЗ (без контроля)****Стратегия 3: Сначала предсказание, потом сбор СНИЗУ ВВЕРХ (под контролем)**

Рисунок 3. Три базовые стратегии картирования подводных ландшафтов (по Ferrier et al., 2006, Brown et al., 2012)

Первый подход – это зонирование, основанное на абиотических факторах, при незначительном или отсутствующем биологическом пробоотборе, обычно выделяют крупные и общие области, что, по мнению Брауна, недостаточно для предсказания распространения биологических сообществ, но может быть успешно использовано при управлении морскими ресурсами. Второй – сначала производится раздельная кластеризация абиотической и биотической информации, затем сравнение результатов и выделение закономерностей. Третий подход противоположен предыдущему, сначала исследуются связи видового разнообразия с условиями окружающей среды, а затем, на основе полученных зависимостей, выделяются однородные области (Brown et al., 2012).

Рассмотрим примеры изучения подводных ландшафтов с точки зрения масштаба, набора методов, стратегии комплексирования данных и использования количественного анализа.

В 2003 году стартовал проект Британской геологической службы и Национального музея Уэльса по изучению Бристольского залива. Одной из целей проекта было использовать как можно больше разнородной информации – применялись многие дистанционные методы исследования (пробоотбор, многолучевой эхолот, гидролокация, сейсмоакустика, подводная видеосъемка). За 3 года существования проекта участники создали методику картографирования геологической и биологической информации и методы ее комплексной интерпретации по стратегии 1 (интеграция точечной биологической информации в установленные абиотически однородные зоны). Результатом исследования стали подробные карты и схемы пространственного распространения осадков, их мощности, биоразнообразия и др. для территории около 2400 км<sup>2</sup>:(MESH, 2008).

В «Методическом пособии» (Лабутина, Балдина, 2011), в разделе, посвященном комплексному картографированию аквальных ландшафтов мелководной акватории на Дамчикском участке Астраханского заповедника и созданию серии электронных карт, приведен пример успешного применения космических снимков, материалов полевых обследований и методов картографирования на основе ГИС (геоинформационных систем).

Подготовлено (Лабутина, Балдина, 2011) пять карт (рельеф дна, степень проточности, подводные грунты, водная растительность и аквальные ландшафты) в базовом масштабе 1:100 000. Обработка снимков и создание карт осуществлялись средствами программного пакета ILWIS. Были использованы космические снимки ETM+ Ландсат и ASTER/Terra, на отдельных этапах работы также КФА-1000/Ресурс-Ф, МСУ-Э/Ресурс-О, HRV/SPOT. Предварительная обработка снимков включала приведение к системе координат, принятой для ранее составленных базовых слоев ГИС заповедника, улучшение пространственного разрешения снимков Landsat «замешиванием» панхроматического канала, а также создание вариантов цветных синтезированных изображений.

Проделанная работа свидетельствует о том, что космические снимки с пространственным разрешением 15–20 м продолжают оставаться отличным материалом для решения географических задач и картографирования в масштабах 1:50 000–1:100 000. Снимки с разрешением 1–2 м полезны при создании обучающей выборки в дополнение к полевым данным. Отмечается, что для изучения и картографирования подводных объектов важно наличие в съемочной системе канала в участке спектра 0,4–0,5 мкм, более высокое пространственное разрешение не компенсирует отсутствие такого канала.

В публикации Д.С. Дудаковой и М.О. Дудакова (Институт озераедения РАН) (Дудакова, Дудаков, 2014) представлены результаты использования методов аэро- и подводной видеосъемки для изучения лимнических донных биотопов в Ладожском озере. Аэросъемка осуществлялась с использованием беспилотного летательного аппарата (БЛА) с подвешенной видеокамерой. Картировались биотопы в пределах глубин от 0 до 5 м. Составлена методика совмещенной аэро- и подводной видеосъемки для исследования биотопов, в которой отмечается высокая оперативность разрабатываемого метода.

В.В. Жариков рассматривает возможности ГИС-технологий при картографировании подводных ландшафтов Японского моря (Жариков и др., 2015). По мнению автора возможности ГИС-технологий, которые сводят «к общему знаменателю» различную пространственную информацию, позволяют провести сопряженный анализ полевых и дистанционных данных, что значительно повышает эффективность картографирования подводных ландшафтов. Однако, реализация потенциала ГИС-технологий в этой области требует решения серии методических задач, связанных со спецификой картографирования морских мелководий. Рассматриваются критерии подбора снимков, способы визуального дешифрирования и алгоритмы компьютерной обработки данных для выявления детальной пространственной структуры геосистем, представлены результаты экспертного и автоматического дешифрирования ДДЗ для района исследований. Подчеркивается, что картографирование морских мелководий – перспективный подход к инвентаризации ландшафтов и экосистем с целью долговременного мониторинга биоразнообразия особо охраняемых акваторий.

Анализ материалов описаний подводных профилей с использованием классификации донных геосистем Японского моря позволил выделить в бухте семь типов ландшафтов. При этом, как отмечают авторы работы (Жариков и др., 2015), около трех четвертей дна бухты располагается в диапазоне глубин, доступном сенсорам космических аппаратов. Оценивая результаты картографирования, они отмечают, что области дна, для которых было возможно экспертное дешифрирование, ограничены глубиной около 10 м. Проведенные исследования показали, что решение задач мониторинга ландшафтного разнообразия обеспечивается мультиспектральными снимками сверхвысокого пространственного разрешения. В частности, снимок КА IKONOS-2 обеспечил необходимую детальность картографирования подводных ландшафтов. Отмечается, что некоторые из фаций невозможно было выделить при водолазной съемке, поскольку их линейные размеры сопоставимы с пределами видимости под водой. Лишь снимок позволяет оценить значение в пространственной структуре геосистем зарослей водорослей на литорали или ранжировать поля зостеры по степени проективного покрытия.

В ряде современных работ (Д.Г. Илюшина, Н.В. Шабалина, А.И. Исаченко, Е.А. Киселевой и др. (Илюшин и др., 2014; Шабалин и др., 2015) рассмотрены методы для оценки состояния донных сообществ, применяющихся в рамках прикладных работ в Белом, Охотском и Японском морях (работы выполнялись ЗАО «Институт экологического проектирования и изысканий» и ЦМИ МГУ). В качестве примера показаны методы выделения, идентификации и картографирования элементов пространственной мозаики бентоса с помощью ГЛБО и подводной видеосъемки. В статье показана необходимость этих данных для решения сложных экологических задач, авторы обращают внимание на проблемность составления комплексных карт уязвимости природных экосистем, на которых ожидается наибольшее воздействие при дампинге грунта, дноуглубительных работах, добыче подводных полезных ископаемых, строительстве портовых сооружений и дамб и т. д.

В публикации А.А. Исхакова, А.В. Хохлова, М.В. Переладова и О.А. Исхакова представлены результаты гидролокационной съемки донных отложений рыбопромысловых участков прибрежных акваторий ряда Северо-Курильских островов (Исхаков и др., 2015). Было выделено 5 типов донных грунтов различного гранулометрического состава: отложения, сложенные частицами от пелитовой до тонкозернистой размерности, то же от псаммитовой до гравийной размерности, то же от псаммитовой до гравийной размерности с рябью волнения, галечно-валунной размерности и фация крупных глыб и валунов с выступами скальных образований.

Следует добавить, что ГЛБО с успехом может быть применен и для контроля за миграцией ценных пород рыб (Мосолов, Скнар, 2011).

Исследования ВНИРО (Переладова и др., 2015) включали в себя комплекс работ с использованием, помимо ГЛБО, дистанционно управляемого подводного аппарата на глубинах до 150 м, водолазного снаряжения на глубинах до 35 м, а также крабовых ловушек и гребешковой драги. В результате исследования были получены данные о распределении донных ландшафтов и сопряженных с ними биоценозов и данные о распределении придонной температуры. Собранные материалы, как отмечают авторы статьи, планируется использовать для оценки состояния запасов промысловых гидробионтов, обитающих в прибрежной зоне северных Курильских островов и условий их естественного воспроизводства.

Другим коллективом специалистов (Лаборатория морских ландшафтов ТИГ ДВО РАН) аналогичные работы на мелководье проведены с использованием легководолазного снаряжения. Выполнялись также эхолотный промер глубин и гидрохимический анализ проб воды и грунта (Арзамасцев и др., 2012; Жариков и др., 2011). Подробные описания субаквальных ландшафтов в каждой точке отбора проб сопровождались фото- и видеосъемкой.

Ландшафты выделяли в соответствии с разработанной ранее системой визуальных картировочных признаков и классифицировались на основе типологии и номенклатуры прибрежных донных ландшафтов Японского моря (Преображенский и др., 2000).

Водолазные наблюдения использовались и при составлении ландшафтной карты донных комплексов прибрежной зоны Тарханкутского полуострова (Панкеева и др., 2014). Подводные исследования прибрежной зоны Тарханкутского полуострова велись методом детального изучения ключевых участков с проведением ландшафтного профилирования. Выбор ключевых участков определялся типом берега (абразионный, абразионно-оползневой и др.). Основная информация о донных ландшафтах прибрежной зоны Тарханкутского полуострова получена в процессе водолазного описания точек наблюдения. Описывались главные компоненты донных ландшафтов – рельеф, современные донные отложения и выходы коренных пород, гидрологические условия, биоценозы. Радиус обследуемой площадки при описании одной точки составлял около 10 м. Изучение литологического состава дна, отбор проб макрофитов и подводное фотографирование проводилось на глубинах от 1 до 15 м. Для детального изучения видового состава, определения численности и биомассы отбирались пробы.

Подход, основанный на применении дистанционных и стандартных методов был реализован при биологических исследованиях и картировании подводных ландшафтов восточной части Финского залива в ходе выполнения проекта ТОПКОНС (Неевин и др., 2015; Орлова и др., 2014)

В проекте ТОПКОНС были задействованы пространственные данные, собранные с использованием спутниковых технологий, методов акустического сканирования дна, подводного фото и видео документирования.

Выполненные одновременно геологические наблюдения и видеосъемка для исследования структуры поселений донных беспозвоночных показали, что, кроме основных выявленных геологических структур - типичных участков ландшафта, существуют переходные зоны, связанные с геологическими процессами.

Применение комплекса геолого-геофизических методов (МЛЭ и ГЛБО) в режиме сплошного покрытия, позволило специалистам ФГУП «ВСЕГЕИ» получить для выбранных ключевых участков площадные акустические изображения поверхности дна и батиметрические данные высокого разрешения. Обработка геофизической информации с помощью специализированных программ и географическая привязка полученных мозаик обеспечила высокую точность отбора проб для геологических и биологических исследований и, в конечном итоге, создать детальные литологические карты и карты подводных ландшафтов.

Подробное описание комплексного подхода при реализации проекта ТОПКОНС приведено в работе М.И. Орловой с соавторами (Орлова и др., 2014).

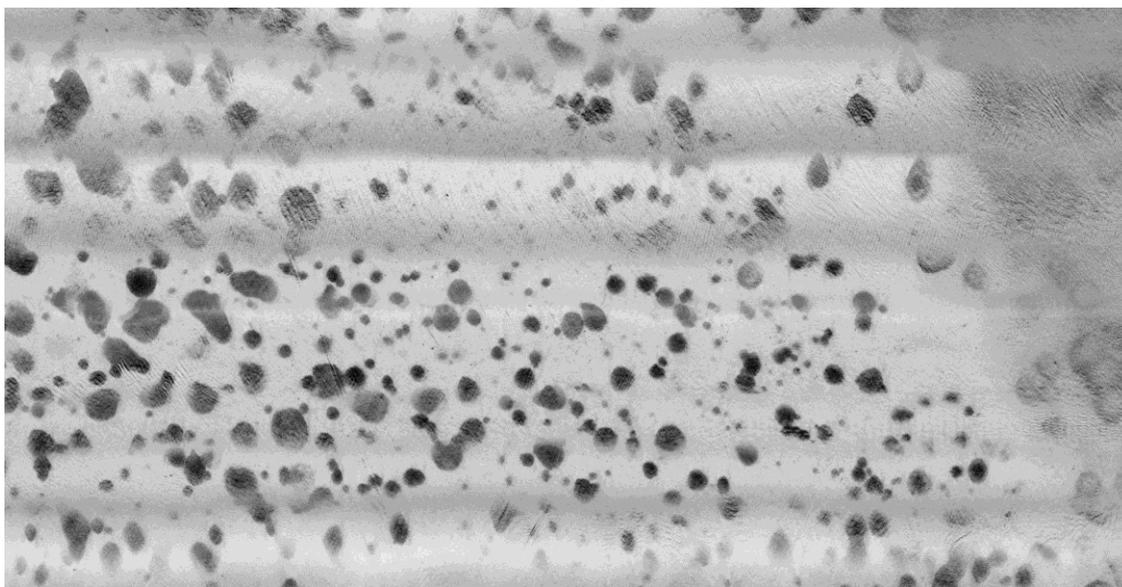
Поскольку в соответствии с практическими и исследовательскими целями проекта из получаемой в ходе его выполнения разносторонней информации должна складываться в том числе наглядная визуальная «картина» реального пространства конкретного ландшафта/биотопа, существенная часть материалов собрана с использованием различных дистанционных методов (Рисунок 4). Благодаря показанным на рисунке методам, исследователь получает в свое распоряжение изображения или их серии, соответствующие различной степени детализации, привязанные к системе географических координат и оптимизированные для решения конкретных природопользовательских и природоохранных задач. Географически позиционированные изображения и их серии далее называются «пространственные данные». Их получают путем проведения первичной и тематической обработки собранных для исследуемого района (участка акватории, береговой зоны, побережья) архивных и современных материалов дистанционного зондирования (МДЗ), видеороликов, сонограмм с использованием соответствующих методов дешифрирования/декодирования.



Рисунок 4. Общая схема комплексного подхода к сбору полевых данных для целей проекта ТОПКОНС, разработанного и опробованного в 2012-2014 гг. (Орлова и др., 2014).

Подытоживая исследования в рамках проекта ТОПКОНС сотрудники отдела Региональной геоэкологии и морской геологии ФГУП «ВСЕГЕИ» заключили, что была разработана и впервые реализована при научных исследованиях и картировании дна восточной (русской) части Финского залива методика детальных высокоточных междисциплинарных экспедиционных исследований.

В последние годы ГЛБО начали применяться и для поиска и изучения различных биологических объектов – от организмов отдельных биотопов (устричных банок, коралловых рифов и пр.) до полного картографирования бентосных биоценозов (Илюшин и др., 2014). При этом опыт многолетних исследований показывает, что наилучший результат достигается при поиске и картографировании наиболее контрастных объектов (Рисунок 5).



*Рисунок 5. Пример мозаики ГЛБО контрастных объектов (устричные банки в заливе Петра Великого, Японское море)*

В.О. Мокиевский ранее в работе также отмечает, что «применение комплексного подхода к изучению донных сообществ с использованием дистанционных методов дает основу для получения более точных результатов, чем водолазные и дночерпательные сборы по сетке станций» (Мокиевский, 2012). Использование дистанционных методов для изучения структуры донных сообществ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами исследования. Это прежде всего оперативность получения информации, высокая точность получаемой батиметрической карты и контуров однородностей (по результатам исследований с помощью ГЛБО) и др.

При исследовании прибрежной зоны наиболее эффективным, по мнению В.О. Мокиевского, представляется сочетание всех методов дистанционных исследований:

- спутниковой фотографии для литорали и самых верхних отделов сублиторали до глубины 5 – 10 м, возможно – 15 м;
- картирования с помощью ГЛБО для глубин от 5–7 м;
- проведение видеосъемки и фотографирования ключевых участков дна.

Опыт российских и зарубежных специалистов дает основание сделать заключение, что наилучшие данные для картографирования донных сообществ могут быть получены сочетанием трех методов – гидролокации, фотографирования дна и отбора биологических проб традиционными методами (Мокиевский и др., 2015).

Опыт использования МЛЭ высокого разрешения в сочетании с анализом фото- и видеозображений для изучения морских экосистем в системе каньонов, расположенных на глубине 184-1059 м в северо-восточной части Атлантического океана представлен в работе (Davies et al., 2014). Выделено 12 биотопов в качестве единиц картографирования. Из них 4 были классифицированы как уязвимые морские экосистемы. Работы проводились для создания репрезентативной сети глубоководных морских ООПТ.

Пример удачного совмещения нескольких видов дистанционных методов при обследовании прибрежной части акватории в Южном Приморье приведен в работе Илюшина (Илюшин и др., 2014).

Основной целью работы Илюшина являлась идентификация элементов пространственной мозаики в нескольких бухтах в заливе Петра Великого (Японское море), выявленных по результатам исследований при помощи ГЛБО. Идентификация целей, выявленных по результатам обследования ГЛБО, производилась с использованием телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) в соответствии с требованиями СП 47.1330.2012 («Инженерные изыскания...», 2013) или водолазного обследования на глубинах от 0 до 35 м. Оптимальным признано совмещение нескольких групп методов – традиционного пробоотбора, акустического исследования, видеосъемки по «транссектам» и фотографирования отдельных объектов или участков дна. Это позволяет достаточно полно охарактеризовать донные подводные комплексы и представить полученные данные в виде карты.

В 2005 году на участке Нильменско-Причерномореченской устьевой местности Кандалакшского залива Белого моря коллективом авторов (Цетлин А.Б., Мокиевский В.О., Токарев М.Ю., Кузуб Н.А., Сорокин В.А. и др.) были проведены работы по изучению состояния объектов животного мира и среды их обитания в придонной части акватории. Использовался комплекс методов: эхолотирование, гидролокация бокового обзора, НСП, высокочастотная многоканальная сейсмоакустика, геологический и биологический пробоотбор с борта судна, легководолазные наблюдения и отбор проб, подводная фото- и видеосъемка. В результате работ была построена литологическая карта и карта величин обратного рассеяния, на основании которых по данным прямых наблюдений были выделены подводные ландшафты (Рисунок 6) (Мокиевский и др., 2012б).

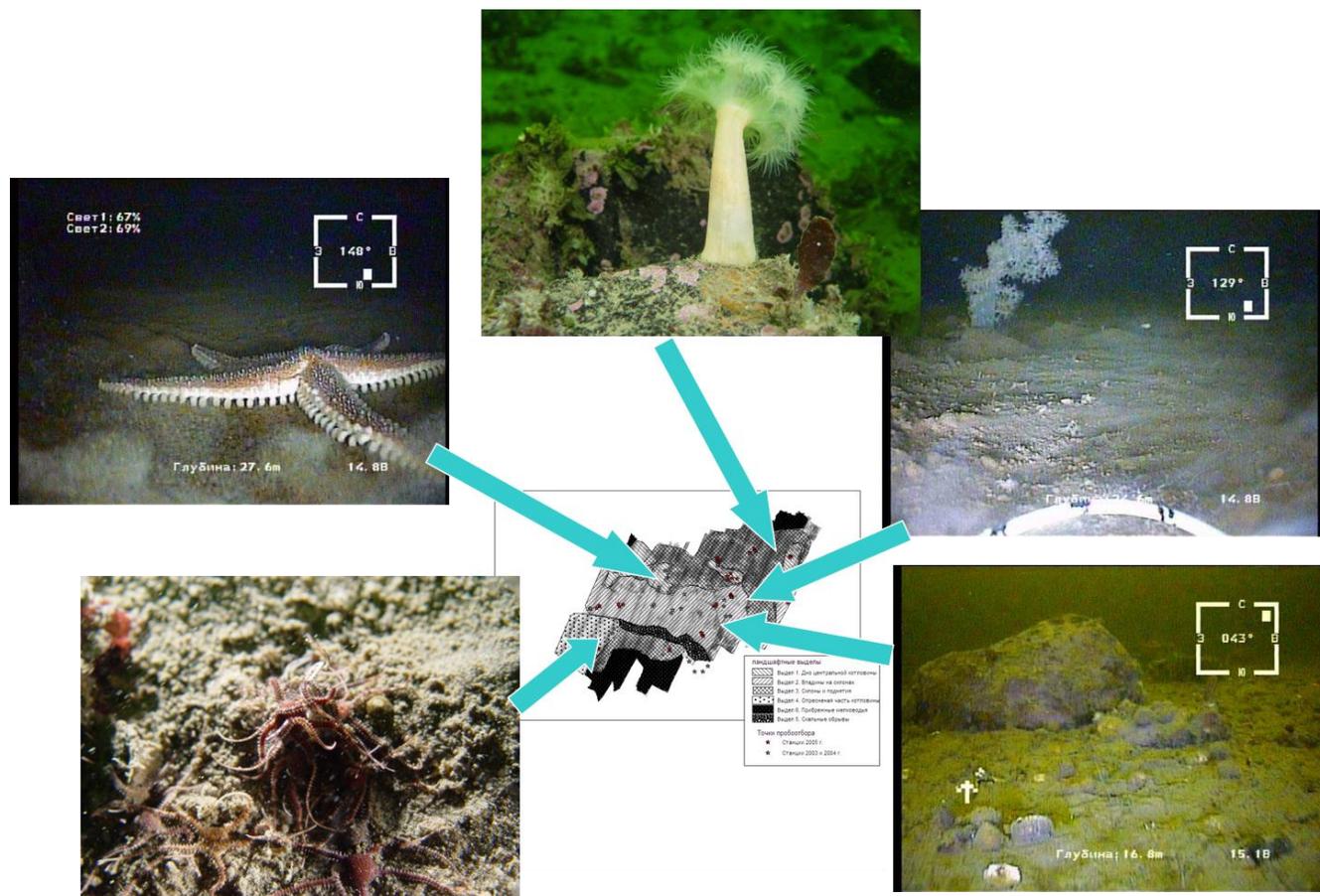


Рисунок 6. Ландшафтные выделы, иллюстрированные подводными фотографиями (Мокиевский и др., 2012б).

Хорошо себя зарекомендовала методика комплексной интерпретации с использованием ГЛБО и при исследованиях структуры поселения морского двустворчатого моллюска *Arctica islandica* в Белом море (Исаченко, 2013). Указанный моллюск является видом-индикатором загрязнения окружающей среды.

Высокая мозаичность рельефа и распределения донных сообществ на визуально однородных участках грунта затрудняет картографирование поселений вида. Для точной оценки количественных показателей распределения вида разработан комплексный подход, при котором традиционные методы исследования (пробоотбор) использовались одновременно с дистанционными: фото- и видеосъемкой и ГЛБО. Применение ГЛБО позволило построить карту распределения биомассы моллюска по трем категориям и составить подробную карту размещения вида и его местообитания (Исаченко, 2013, Isachenko et al., 2014).

Ландшафтно-экологическое районирование субаквальных комплексов юго-восточной части Балтийского моря проводилось Дороховым Д.В. на основе модифицированной стандартной методики, принятой в ЕС, с использованием дистанционных гидроакустических и контактных геологических, математических, картографических, сравнительно-географических

методов. Методика предполагает использование «первичных» параметров, которые оказывают наибольшее влияние на распределение видов донных сообществ: вертикальная зональность, типы субстрата, придонная соленость. А также «вторичных», которые имеют региональное геоэкологическое значение: придонная температура и ледовый покров. В работе для автоматического выделения положительных и отрицательных форм рельефа разных порядков использовался атрибут цифровой модели рельефа дна «Индекс Батиметрической Позиции». Картирование выполнено на двух уровнях: региональный (масштаб 1:700000, выделены ландшафты) и локальный (масштаб 1:50000, выделены урочища и фации). (Дорохов, 2018).

Надо отметить, что при подготовке данных к комплексированию существуют качественный и количественный подход. принципиальные различия. Для МЛЭ в абсолютном большинстве используются цифровые данные. Для ГЛБО и НСП можно выделить два подхода: анализ сигнала (количественный анализ) и анализ обработанного изображения (качественная интерпретация).

## **Глава. 2      Геолого-геофизическая характеристика Кандалакшского залива Белого моря**

### **2.1 История исследований**

Белое море - единственное внутреннее море на севере России. Несмотря на свою сравнительно небольшую величину, оно чрезвычайно разнообразно по геологическому строению, геоморфологии, гидродинамическому режиму и природным условиям. Изучение геологии, геоморфологии и подводных ландшафтов дна Белого моря имеет богатую историю, на его акватории успешно работали сотрудники ИО АН, ИО РАН, ВСЕГЕИ, МГУ, ГИН РАН, «Архангельскгеологии» и ряда других организаций. Первым комплексным исследованием геологического строения Белого моря являлась экспедиция ИО АН СССР в 1964–1968 гг. В ходе этой экспедиции подробно были изучены берега Белого моря (Ионин и др., 1965). Основное внимание было уделено донным осадкам, которые изучались с помощью вибробурения. Полученные керны были подвергнуты литологическим и биостратиграфическим анализам. По данным этих исследований была составлена стратиграфическая схема, где последовательно (снизу-вверх) выделялись ледниковые, ледниково-озерные, ледниково-морские и морские, а также переходные типы отложений (Невесский, Медведев, 1973; Невесский и др., 1977).

В Кандалакшском заливе было пройдено 4 профиля с вибротрубками. По данным эхолотирования был показан расчлененный рельеф морского дна, причем впервые было показано влияние неотектонических процессов как на формирование рельефа морского дна, так и на особенности накопления донных отложений. Авторы предполагали, что неотектонические движения обусловлены преобладающим всплывание Кольского полуострова. Для нас важно, что было показано определяющее влияние разломов северо-западного простирания на формирование узких тектонических депрессий. Не менее важно, что в работе была сделана первая попытка фациального расчленения донных отложений. В частности, в Кандалакшском заливе были выделены фации склонов, а в фиардах вдающихся в его северные и южные берега, были выделены фации заливов. (Рисунок 7)

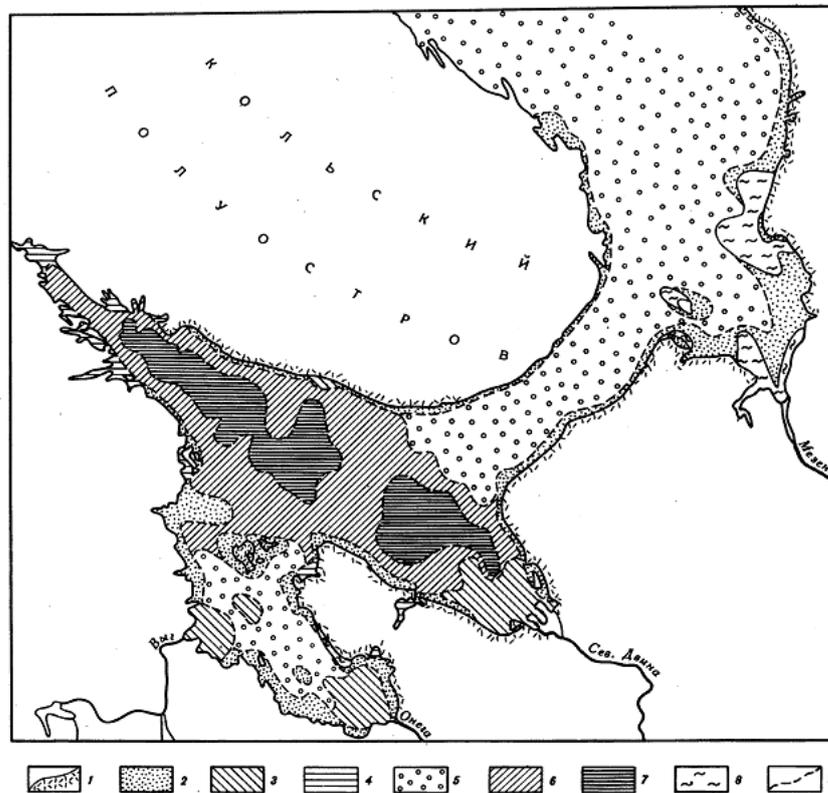


Рисунок 7. Схема размещения фаций осадконакопления на площади Белого моря (Невеский и др, 1977). 1- фация пляжей; 2 – прибрежная фация; 3 – фация дельт и предустьевых районов; 4 – фация заливов; 5 – фация обширных морских мелководий; 6 – фация склонов впадины моря; 7 – фация срединной части моря; 8 – бенч; 9 – границы фациальных зон.

Дальнейшие комплексные исследования геологии и истории развития Белого моря связаны с проведением в Белом море опытно-методической и опытно-производственной геологической съемки среднего масштаба (ГСШ-200). Эти работы проводило ВСЕГЕИ, начиная с 1972г. В рамках этих работ были выполнены сейсмоакустические исследования, за которые отвечала лаборатория Сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ под

руководством А.В. Калинина (Калинин и др., 1983, Спиридонов и др., 1980). Первые сейсмограммы были получены в Кандалакшском заливе между Порьей губой и Турьем полуостровом у южного побережья Кольского полуострова. Впервые был проведен и профиль, пересекающий Кандалакшский залив от Кольского полуострова до о-ва Великий. С этого периода в практику работ был внедрен сейсмоакустический разрез, начинающийся с толщи ледниковых отложений, непосредственно залегающих на кристаллических породах фундамента и толща надледниковых осадков, в которой различали слоистые глины позднеледникового этапа развития Белого моря и голоценовые морские отложения. Этот сейсмический разрез сохранил свое значение и до настоящего времени.

Основные результаты сейсмоакустических работ в Белом море были изложены в диссертации Н.А. Девдариани (Девдариани, 1985), а также нашли свое отражение в записках к Государственным геологическим картам масштаба 1: 1 000 000 и в обобщающей работе по строению четвертичного чехла Белого моря (Рыбалко и др., 2017).

Впоследствии геологическое картирование среднего масштаба (ГСШ-200) в восточной части Белого моря и в проливе Горло проводила Новодвинская партия Архангельского геологического управления (80-года прошлого века). Пятилетний этап их работ, включая и сейсмоакустическое профилирование позволил охарактеризовать строение четвертичных отложений в Горле Белого моря (Соболев и др., 1995). Здесь, в результате бурения были выявлены подстилающие валдайскую морену микулинские отложения, представленные песками, возраст которых по данным термолюминисцентного анализа составлял от 111 до 161 тыс. лет (Соболев и др., 1995). Важным обстоятельством являлось сохранение основных черт сейсмоакустического разреза от ледниковых отложений Скандинавского ледника до морских голоценовых отложений, как на западе (Кандалакшский залив), так и на востоке Белого моря, причем было установлено, что проникновение морских вод из Баренцева моря началось в аллереде – начале бореала (Глушанкова и др., 2020). Таким образом, было окончательно доказано, что ледниковый этап развития Белого моря сыграл очень важную роль в формировании морфоскульптуры беломорской котловины, а приледниковый этап характеризовался наиболее мощной седиментацией, когда формировались ленточноподобные ледниково-озерные и ледниково-морские осадки.

Полученные результаты были использованы для издания в составе комплекта Госгеолкарты 1000 (лист Апатиты) первой карты четвертичных отложений Белого моря (без Воронки) (Государственная ..., 2004).

После 2000 годов начался новый этап изучения Белого моря. Он включал морские геологические исследования четвертичных отложений ИОРАН по Программе «Мировой океан»

в 2004–2005 г.г. под руководством акад. А.П. Лисицына. В ходе этих работ были отобраны две опорные трубки в Кандалакшском заливе (Рыбалко и др., 2009, Лисицын и др., 2017). Легкие пробоотборные работы были проведены по программе «Геоэкологический мониторинг Роснедра РФ с НИС «Эколог», которые в 2004 году охватили и Кандалакшский залив, вплоть до его кутовой части. Геофизические работы по этим программам не предусматривались. В 2004 году был выполнен региональный геолого-геофизический профиль АР-3 от Кеми через Белое море в пролив Горло. Он положил начало площадной сейсмоакустической съемке Белого моря (МАГЭ) в 2005–2007 гг., которые были использованы для подготовки листов Q-35-38 Государственной геологической карты масштаба 1:1000000, охватывающих дно всего Белого моря (Государственная ..., 2012). Сами профили не захватили большую часть Кандалакшского залива, но для Белого моря была составлена первая карта мощностей рыхлых отложений, существенно уточнены контуры краевых ледниковых гряд, впервые выявлены более древние, чем верхний валдай, ледниковые отложения, а также составлена первая сеймостратиграфическая схема четвертичных отложений Белого моря (Шлыкова, 2007; Тарасов, Шлыкова, 2006).

Заметный вклад в изучение геологического строения Белого моря (в частности – Кандалакшского залива) внесла серия работ, выполненных на базе Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова (ББС МГУ) в рамках научно-образовательной морской практики Геологического факультета МГУ. Они включали сейсмоакустическое профилирование, также использовались методы гидролокации бокового обзора (ГЛБО) и многолучевого эхолотирования (МЛЭ). Геофизические исследования совмещались с подводными телевизионными наблюдениями, погружениями аквалангистов и легкого геологического пробоотбора, что положило начало подводным ландшафтными исследованиям (Кубышкина и др., 2012, Сорокин и др. 2009, Токарев, 2016, Терёхина, Токарев, 2021). Материалы этих исследований, в которых автор диссертации принимала непосредственное участие, и послужили основой для настоящей диссертации.

## **2.2 Геологическое строение**

Кандалакшский залив является северо-западным, наиболее глубоководным, заливом Белого моря. Большая часть его располагается в пределах Балтийского кристаллического щита, его Беломорского блока, который сложен наиболее древними метаморфитами архея и нижнего протерозоя (возраст 3,0–2,5 млрд лет). Они представлены различными гнейсами (биотитовыми и

гранат-биотитовыми, а также амфиболитами, которые сформировались за счет регионального метаморфизма интрузивных пород основного состава. Эти породы объединены в Беломорскую серию. Мощность беломорид предположительно составляет 8–10 км, Тектоническое строение пород, слагающих Беломорскую серию, чрезвычайно сложное. Оно сформировалось в результате проявления нескольких фаз деформации. (Балуев и др., 2012). В тектоническом плане беломориды образуют антиклинорий, сводовая часть которого проходит по оси Кандалакшского залива (Маев и др., 2010). Эти породы образуют кристаллический фундамент, который на сейсмограммах выделяется как «акустический фундамент». Он характеризуется однородным типом сейсмической записи, а его поверхность выделяется по четким высокоамплитудным положительным осям синфазности с многочисленными дифракциями. Скорость продольных волн в фундаменте составляет порядка 2000-3000 м/с, плотность пород – 2.6 – 2.7 г/см<sup>3</sup>. Строение фундамента носит ярко выраженный блоковый характер (Маев и др., 2010).

Крупнейшим тектоническим событием докембрия явилось обрушение этого свода в рифее с образованием наложенного на его осевую часть Кандалакшского грабен-прогиба. Сам этот прогиб входит в систему рифтогенных желобов, получивших название палеорифтовой системы Белого моря (Балуев и др., 2002). По существующим ныне представлениям, опирающимся на геофизические материалы МАГЭ, полученные в начале века палеорифты, в том числе и Кандалакшский сформировались в среднем рифее на раннедокембрийском консолидированном основании (в интервале 1263–1080 млн лет назад). Активизация движений в Кандалакшском палерифте произошла в среднем палеозое, когда широкое развитие получил щелочной магматизм, Свидетельством чему являются многочисленные дайки на островах в проливе Великая Салма, и в конце кайнозоя, когда образовался современный бассейн Белого моря. (Балуев и др., 2012). Отложения, выполняющие Кандалакшский желоб, впервые выделенные при совместных морских геологосъемочных работах МГУ-ВСЕГЕИ в 70-х годах прошлого века (Спиридонов и др., 1980), в настоящее время выступают на дневную поверхность вдоль Терского берега Белого моря к востоку от Турьего полуострова в виде терригенных красноцветных песчаников (Терская свита).

В настоящее время Кандалакшский палеорифт представляет собой грабенообразную депрессию северо-западного простирания, протягивающийся от кутовой части до условной линии мыс Олений – мыс Чаваньга. Он включает в себя два четко различающихся по морфологии бассейна: глубоководный грабен, выполненный мощной толщей верхнепротерозойских песчаников терской свиты. Эта наиболее глубоководная часть Белого моря замыкается у островов Средние луды. Далее он сильно сужается, глубоководная часть превращается в узкую извилистую ложбину, которая простирается до самой кутовой части в месте впадения р. Нивы.

Глубины здесь обычно не превышают 60 м, а в самой вершине снижаются до 20 м (Рыбалко и др., 2024). Высказано мнение, что эта мелководная часть Кандалакшского залива представляет собой современный развивающийся в северо-западном направлении рифт (Балуев и др., 2012).

В тектоническом отношении описываемые структуры и слагающие их отложения являются образованиями дочехольного этапа развития Русской плиты. Формирование собственно чехла началось в венде, а в рифее тектоническая активизация в пределах Кольского и Карельского мегаблоков ознаменовалась глубокими расколами северо-западного простирания, вследствие чего возникли грабенообразные депрессии, где происходило накопление терригенных осадков, поступающих с разрушающихся приподнятых тектонических блоков, что и привело к накоплению толщ обломочных осадков мощностью до 2-х км (Балуев и др., 2012). Характерной особенностью этих депрессий является практически полное отсутствие магматизма, что отличает их от современных и ископаемых рифтов.

Пролив Великая Салма протягивается параллельно глубоководной части Кандалакшского залива и представляет собой тектоническую грабенообразную депрессию. С Кандалакшской ложбиной их разделяет приподнятый тектонический блок острова Великий, с юго-восточной стороны он ограничен Ругозерско-Кузокоцким блоками, интенсивно раздробленными, что находит отражение в шхерном рельефе и многочисленных сейсмодислокациях (Маев и др., 2010, Авенариус и др., 2005). Сама депрессия имеет ячеистое строение, состоит из ряда грабенообразных впадин, разделенных приподнятыми мелкими тектоническими блоками. Все контакты между ними дизъюнктивные. Эта цепочка впадин протягивается вдоль оси пролива в виде активного тектонического шва, смещенного к подножию юго-восточного блока. (Маев и др., 2010, Шварев и др., 2022). Тектоническая активность в этой зоне сохраняется вплоть до наших дней, о чем говорят многочисленные оползни, триггером для которых и являются современные сейсмотолчки (Рыбалко и др., 2024).

Характерной особенностью, как дна Кандалакшского залива, так и окружающих берегов, является отсутствие в стратиграфическом разрезе более молодых отложений, за исключением четвертичных. Это связано с тем, что на протяжении всего фанерозоя как Кольский, так и Карельский мегаблоки испытывали устойчивые восходящие движения. Четвертичный покров в целом маломощен, хотя существенно превосходит по этому параметру территорию суши и крайне изменчив по строению. Он представлен как затопленными в ходе гляциоэвстатической трансгрессии континентальными фациями, так и собственно морскими отложениями. Возраст отложений рыхлого чехла обычно не превышает возраста последнего Скандинавского (Осташковского) оледенения, а мощность его чрезвычайно изменчива. В осевой части залива она может достигать 60 м, но обычно составляет 20-50 м. Наибольшая информация об его строении

получена в результате сейсмоакустического профилирования (Рыбалко и др., 2017). Эти данные, обобщенные в целом ряде работ показывают, что наряду с достаточно мощными толщами четвертичных отложений на дне беломорского шельфа и особенно на его берегах существуют многочисленные выходы на поверхность пород кристаллического фундамента, а на отдельных участках побережья были зафиксированы высокие скорости неотектонического воздымания (Кошечкин, 1979). Например, на полуострове Киндо (Карельский берег Кандалакшского залива) современная скорость поднятия территории - 5-5,5 мм/год, а с начала до середины голоцена они варьировались от 9 до 13 мм/год (Романенко, Шилова, 2012). Заметное влияние на современный рельеф и распределение рыхлых отложений оказывает и сейсмичность территории – в Кандалакшском заливе 5-7 балльные землетрясения повторяются с периодичностью 20-50 лет, а ориентировочная магнитуда древних землетрясений (поздний неоплейстоцен-начало голоцена) могла достигать 7,1 (Шевченко и др., 2007).

В целом схема строения четвертичных отложений в Кандалакшском заливе представляет классический гляциальный цикл: ледниковые - комплекс послеледниковых - морские отложения позднепослеледникового возраста (Спиридонов и др., 1980). На сейсмограммах отчетливо выделяются кристаллический фундамент (поверхность), ледниковые и послеледниковые отложения (Рисунок 8)

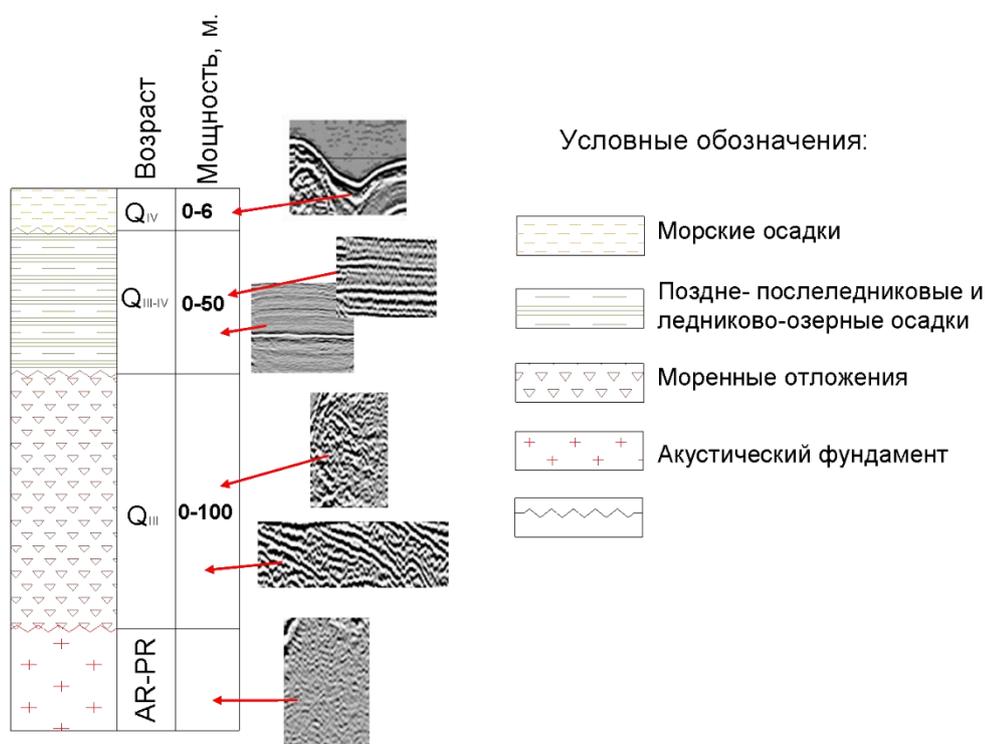


Рисунок 8. Обобщенный сеймостратиграфический разрез полигона «Глубоководный» в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря (Кубышкина и др., 2012)

В основании разреза рыхлых отложений залегает морена (тилл), представленная отложениями осташковского горизонта валдайского надгоризонта. На сейсмограммах они выделяются как второй сейсмокомплекс (ССКII), который широко развит практически на всей территории Белого моря. Этот комплекс отложений был выделен при совместной геологической съемке ВСЕГЕИ и МГУ еще в 70-80-х годах (Девдариани, 1985). На сейсмограммах отложения, слагающие сейсмокомплекс ССКII характеризуются нерегулярным, хаотическим типом записи с отдельными, довольно протяженными (до 10-20 км) отражающими рефлекторами. Характер залегания, в основном, облекающий, хотя наибольшие мощности формируются около выступов коренного фундамента, где ледник при своем движении встречал препятствие. Самая большая мощность морены – 150 м зафиксирована в прибортовой части Кандалакшского грабена, за выступом фундамента в месте слияния двух лопастей палеоледника. В нижней части этой толщи иногда фиксируются признаки слоистости. Эти отложения были вскрыты в северной части Кандалакшского залива вибротрубками: глинистые пески с большим содержанием обломочного материала, состоящего в основном из обломков кристаллических пород. Отложения плотные, содержание пылицы в них небольшое и она сильно деформирована (Геологическая карта..., 2012).

Мощность ледниковых отложений варьирует от первых до 25 м. Они сложены плотными сухими, серыми глинистыми песками с постоянным присутствием валунно-галечного материала, количество которого может достигать 50 % всего объема осадков.

Ледниковые отложения представлены двумя генетическими типами: основной и краевой (слагающей грядообразные положительные формы рельефа) моренами. Геологические данные позволяют выделить также поверхностный горизонт морен, возникающий при выносе мелкозема при таянии ледника, а также в результате воздействия современных волновых процессов. Этот тип отложений получил название «абляционной морены» и практически именно с ней мы имеем дело при легком пробоотборе. Картирование моренных гряд на дне Белого моря во многом помогло восстановить картину дегляциации в морском бассейне, характеризующуюся неоднократными осцилляциями ледника в период с 13000 до 9000 лет назад, когда ледник оставил пределы современной беломорской котловины. Наиболее крупная моренная гряда известна в Кандалакшском заливе на поднятии островов Средние луды (Рыбалко и др., 2024).

Флювиальные (fHios) отложения в пределах Белого моря встречаются эпизодически и зафиксированы в основном в Нильме -губе и прилегающей части пролива Великая Салма, а также в Онежском заливе (Геологическая карта..., 2012)

Ледниковые образования перекрыты обычно сейсмогоризонтом, представленным полупрозрачными слоистыми осадками (ССКIII). Слоистость различного типа является

характеристическим признаком этого ССК. присутствуют резкие изменения мощности отдельных элементов этой части разреза (вплоть до исчезновения) (Алявдин и др., 1977). Сейсмофациям, разделенным границами несогласий, соответствуют (снизу–вверх), по-видимому, ледниково-озерные, ледниково-морские и морские отложения (Спиридонов и др., 1980; Кубышкина и др., 2012).

По данным геологического прободобора ледниково-морским отложениям соответствует толща пепельно-серых песчанистых алевроглин с характерной ленточноподобной слоистостью и примесью гравия и гальки кристаллических пород. Общая мощность вскрытого прободобором горизонта. обычно составляет первые метры, но может возрастать по геофизическим данным до 15-20м. Описываемые отложения образуют обширные выходы на поверхности морского дна, прикрытые маломощным чехлом подводного перлювия (валунно-галечной отмостки), на глубинах менее 60 м. Определение возраста данных отложений опирается на результаты спорово-пыльцевого анализа, который позволяет выделять в осадках «холодные» (нижний, средний и верхний дриасы) и «теплые» (межстадиалы беллинг и аллеред) этапы, и диатомового анализов. Роль последнего состоит в воссоздании экологических условий (пресные, солоноватые и морские). (Алявдин и др., 1977). В Кандалакшском заливе по данным биостратиграфических анализов уверенно опознаются отложения с среднего по верхний дриас. Наличие в них солоновато-морской диатомовой флоры позволяет диагностировать их как ледниково-морские (Рыбалко и др., 2017) Таким образом, можно утверждать, что уже в позднем неоплейстоцене в Кандалакшском заливе существовал приледниковый водный бассейн с сезонным ледовым покровом. Именно в этот период, во впадину Кандалакшского залива вместе с тальми водами поступила основная масса обломочного материала. Данные сейсмоакустического профилирования убедительно свидетельствуют, что в позднем неоплейстоцене происходил главный этап выравнивания донного постледникового рельефа.

В проливе Великая Салма ледниково-морские отложения были вскрыты только в последние годы. Они представлены серыми ленточнослоистыми осадками. В Нильма-губе, непосредственно у входа во внутреннюю часть губы в 2022 году была вскрыта толща субгоризонтального переслаивания песков тонкозернистые с песчаными глинами и с обилием обломков дресвяной и щебнистой размерности, хаотично распределенных по всему вскрытому интервалу. Видимо, это проксимальные ледниково-озерные осадки, накапливающиеся непосредственно у края ледника. Таким образом, последние данные как сейсмоакустические, так и прямые геологические свидетельствуют, что приледниковый бассейн, появился в Кандалакшском заливе раньше, чем ранее предполагалось, уже в среднем дриасе, а подледный седиментогенез, в понимании Е.Н. Невесского (Невесский и др 1967), отсутствовал.

Наиболее верхний сейсмоакустический горизонт, хорошо выделяемый по данным высокочастотного сейсмопрофилирования (Рыбалко и др., 2017), уверенно сопоставляется с толщей голоценовых нефелоидных отложений. Последние полученные данные с высокоразрешающей сейсмоакустической аппаратурой позволяют выделить в его составе два подкомплекса, разделенных иногда подобием углового несогласия. Данные геологического пробоотбора подтверждают это предположение и свидетельствуют, что в толще голоценовых отложений выделяются две седиментационные пачки. Нижняя из них, встречающаяся, только в наиболее полных разрезах, представлена тонкоотмученными глинами (плотными илами) коричневого цвета. Максимальная вскрытая мощность этих отложений составляет 1.2 м. Характерно присутствие в них аутигенных микроконкреций сульфидов, а также появление четких черных стяжений гидротроилита и редких обломков раковин морских моллюсков. По данным палинологического анализа (определения Е.А. Спиридоновой) было выделено два палинокомплекса, которые по ее данным можно соотнести с пребореальным и бореальным временем голоцена (Алявдин и др., 1977).

Верхняя пачка покровного сеймостратиграфического комплекса представлена фациально-разнообразными отложениями среднего и верхнего голоцена. В открытой части моря – это типичные нефелоидные осадки. Средняя мощность описываемой толщи составляет 4-5 метров, но может достигать 10-15 м. В прибрежной зоне (до глубин 10 м) этим осадкам соответствуют толщи песков и песчано-галечных образований, формирование которых связано с волновыми процессами. Мощность прибрежных песчаных тел может достигать 10 и более метров (Рыбалко и др., 2017).

### 2.3 Рельеф дна

Современный рельеф Кандалакшского залива имеет гетерогенное происхождение. Формирование самой впадины произошло в результате активизации в конце плиоцена тектонических границ Кандалакшского (Кандалакшско-Онежского) грабена (см. выше), что привело к образованию глубоководной депрессии в пределах верхнепротерозойского рифта. В четвертичное время Кандалакшская ложбина неоднократно была модифицирована ледниковыми потоками, которые спускались в нее со стороны Финляндии (по мере развития Скандинавского ледникового щита). Периоды наступления ледника были неоднократными. Благодаря деятельности покровных ледников существенные изменения претерпели первичные

тектонические и эрозионные формы рельефа (Никифоров и др., 2012). Периодическое развитие ледниковых щитов в четвертичное время приводило к сильным колебаниям уровня Мирового океана. Таким образом, практически вся площадь как кандалакшского, так и беломорского шельфа в четвертичное время была ареной широкомасштабных экзогенных преобразований.

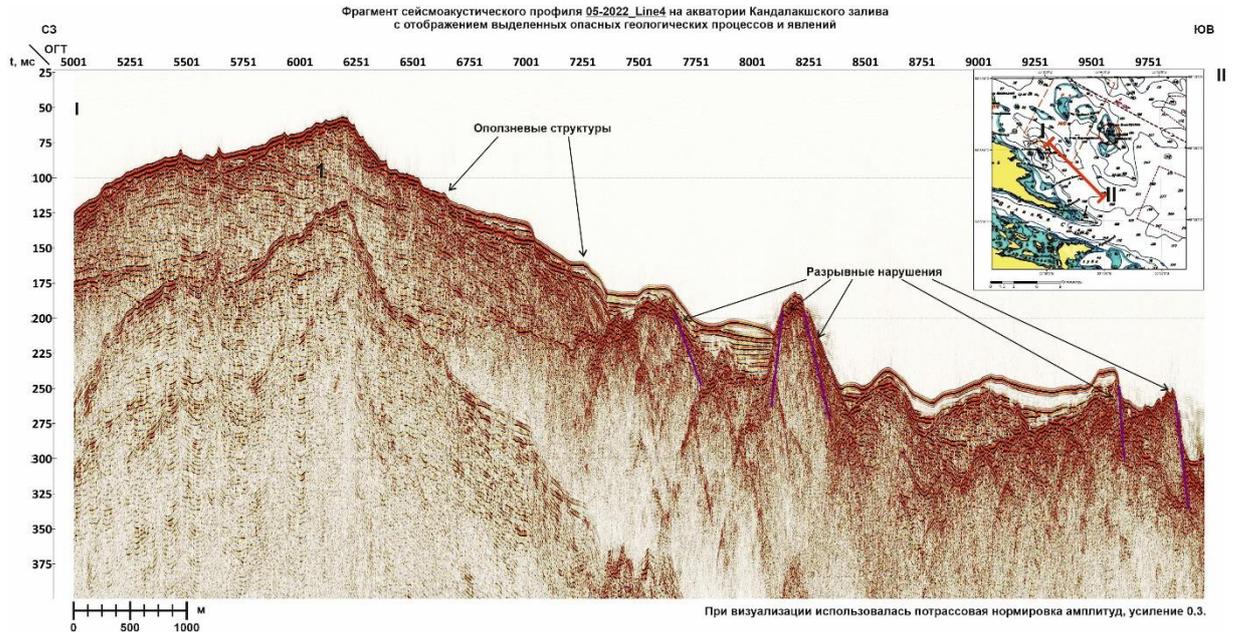
Макрорельеф дна Кандалакшского залива, наследующего контуры Кандалакшского (Кандалакшско-Онежского) грабена определяется структурно-тектоническими особенностями кристаллического фундамента (Варейчук, Игнатов, 1989). Выделяются четыре крупные впадины, вытянутые вдоль оси залива, и ряд более мелких впадин, разделенных поднятиями дна. Наиболее глубокая впадина расположена в вершине Кандалакшского залива, на ее дне отмечена максимальная для Белого моря глубина — 343 м. В Центральном районе расположены три более мелководные впадины со средней относительной глубиной 40—60 м и максимальной до 250—280 м (Никифоров и др., 2012). По данным геологов Геологического института (ГИН) глубоководная впадина представляет собой, как уже отмечалось выше морфологическим выражением верхнепротерозойского рифта, три мелководных уже находятся в пределах развивающейся современной рифтовой системы (Балуев и др., 2012).

Дно Кандалакшского залива представляет собой подводную денудационную ступенчатую равнину (Мануйлов и др., 1977). Мелководную часть, как и прилежащие, можно отнести к прибрежной, холмистой, резко расчлененной экзарационной реликтовой равнине (Варейчук, Игнатов, 1989). Таким образом, можно констатировать, что основные черты рельефа позволяют отнести его к структурно-денудационному типу, интенсивно моделированному ледниковыми и постледниковыми процессами.

Ледниковая обработка рельефа привела к образованию системы экзарационных ложбин и останцов, имеющих преимущественно северо-западное простирание Прекрасный пример — Кандалакшские шхеры. Обработанные ледником выходы кристаллического фундамента образуют многочисленные скальные выходы на дне. Распределение чехла рыхлых отложений в пределах экзарационной прибрежной равнины подчинено структурному рельефу (Варейчук, Игнатов, 1989). Так, положение озов в Нильма губе определяется положением края ледника, в подледных каналах которого и прошло первичное формирование флювиогляциальных потоков, из которых и возникли в будущем сами озы.

Однако, преобразование рельефа дна Кандалакшского залива под влиянием структурного фактора не завершилось в позднем неоплейстоцене. В частности, большую роль в этом играют современные геодинамические движения, которые находят свое отражение как в сейсмодислокациях (Николаева, 2009, Шварев и др., 2022), так и в возникновении ступенчатости в рельефе морского дна. Анализ сейсмограмм как в проливе Великая Салма, так и в прилегающих

частях Кандалакшского залива показывает, что на многих участках субвертикальные разрывные нарушения прослеживаются в толще постледниковых отложений, смещая в том числе и неоплейстоценовые отложения (Рисунок 9)



*Рисунок 9. Структурно-предопределенный рельеф гряды, отражающей границу приподнятого тектонического блока, модифицированному многочисленными разрывами голоценового возраста и инжецированными ими гравитационными процессами (Кандалакшский залив, работы 2022 года)*

Эти разломы смещают не только кровлю фундамента, но и кровлю ледникового комплекса и слои в самой верхней части разреза. Амплитуда смещения, как правило, не превышает несколько метров. Большая их часть хорошо выражена в современном рельефе, указывает на их активность и в настоящее время.

Наиболее подробно современный рельеф морского дна в Кандалакшском заливе рассмотрен в публикации С.Л. Никифорова с соавторами о построении цифровой модели рельефа с подробностью от 1:100 000 до 1:200 000 (Никифоров и др., 2012)

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

Одной из задач диссертационного исследования была разработка технологии сбора и анализа гидроакустических данных, включающая методику и программное обеспечение для качественной и количественной интерпретации, обеспечивающая получение информации о геолого-геоморфологических компонентах подводных ландшафтов.

Идея предлагаемого автором метода сбора и количественного анализа результатов мультисигментных 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, позволяющий проводить исследования в различных диапазонах частот. Кроме того, необходимо определить методику съемки с указанием параметров разрешающей способности исследований в плане и глубине. Разрешающая способность методов должна быть достаточной для получения представительной выборки для статистической оценки распределения величин отражательной способности, обратного рассеяния или их комбинации (атрибутов) в пределах площадок единичных измерений в соответствии с масштабом прямых наблюдений (пробоотбора, фото- и видеосъемки) для последующей комплексной интерпретации и верификации результатов количественного анализа (Ампиров, Терёхина, Токарев, 2021).

#### **3.1 Методика сбора гидроакустических данных<sup>1</sup>**

Как было показано в главе 1 для успешного картографирования подводных ландшафтов требуется комплексный подход, объединяющий результаты исследований геологического

---

<sup>1</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

строения, геоморфологии и бентосных сообществ (Гершанович Д. Е., 1985, Преображенский Б.В., 1990, Мокиевский В.О., 2012, Исаченко А. И., 2013 и др.).

В нормативных документах указано, что при построении карт подводных ландшафтов рекомендуется использовать (при наличии) данные инженерно-геодезических, инженерно-геологических (в том числе ГЛБО, батиметрии) (СП 504.1325800.2021, 2021).

Задача изучения геологического строения верхней части разреза решается сейсмоакустическими методами. Геологическое строение и фациальный состав осадков определяют кинематические и динамические особенности волнового поля в сейсмоакустическом диапазоне частот. Применяющиеся стандартные программно-аппаратные комплексы успешно решают задачу исследования верхней части разреза, и для картирования подводных ландшафтов усовершенствования не требуют (Токарев, 2016).

Геоморфологические элементы находят свое отражение в рельефе дна и могут быть идентифицированы при проведении многолучевого эхолотирования.

В то же время использование гидролокации в различных частотных диапазонах для определения состава донных осадков находится в рамках научно-исследовательских работ и опытно-промышленных испытаний (Tamsett et al., 2019). Таким образом из основных гидроакустических методов (многолучевое эхолотирование (МЛЭ), гидролокация бокового обзора (ГЛБО), и акустическое профилирование (АПр)), разработка эффективной технологии картирования подводных ландшафтов необходима, прежде всего, в части гидролокации бокового обзора (Ампиров, Терёхина, Токарев, 2019).

Для разработки технических требований к составу комплекса и параметрам полевых наблюдений были спроектированы и выполнены опытно-методические работы, где было протестировано несколько современных гидролокаторов бокового обзора: *Teledyne Benthos C3D+SBP* с частотой 200 кГц и *Klein 3900* с частотами 445 и 900 кГц. В таблице ниже представлено описание данных аппаратов (Таблица 4).

---

[1]. Ампиров 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.

Таблица 4. Техническая характеристика оборудования для осуществления гидролокационной съемки.

Название	Гидролокатор бокового обзора Klein 3900		Гидролокатор-профилограф Teledyne Benthos C3D+SBP
Фотография			
Частоты	900 кГц	445 кГц	200 кГц
Разрешающая способность	0,5 см	2,5 см	4,5 м
Ширина луча	Горизонтальный: 0.21°; вертикальный: 45°		Горизонтальный: 1°; вертикальный: 60°
Диапазон	10 - 200 м		25 - 300 м
Максимальная дальность	50 м	150 м	300 м
Глубина погружения	200 м		До 2000 м
Размеры	Длина 122 см, диаметр 8.9 см		Длина 208.7 см, диаметр 51 см
Вес	29 кг		158 кг
Датчики	Roll, pitch, heading		Roll, pitch, heading
Опции	Альтиметр		Альтиметр
Формат данных навигации	NMEA 0183		NMEA 0183
Электропитание	120 Вт @ 120/240 ВАХ, 50/60 Гц		300 Вт @ 120/240 ВАХ
Формат данных	SDF или XTF		XTF

Для каждой частоты необходимо подобрать оптимальную методику съемки. Различия продиктованы возможностями гидролокаторов и целью съемки.

Геологические задачи ГЛБО для определения компонентов ландшафтов можно обобщить следующим образом:

1. Выделение отдельных объектов

С точки зрения биологической составляющей ландшафта этот параметр имеет важное значение, так как некоторые бентосные сообщества формируют распознаваемые формы на морском дне (коралловые рифы, устричные и мидиевые банки), а так же на отдельных валунах формируются биотопы отличные от обитателей илистых и песчаных грунтов.

2. Выделение однородных областей, характеризующихся различными типами осадков

Выделение однородных областей лежит в основе построения литологической карты территории и бентосного картирования.

Рассмотрим возможности низко-, средне- и высокочастотной гидролокационной съемки при решении этих двух задач.

При выделении объектов на морском дне по данным ГЛБО основным параметром является пространственная разрешающая способность (Ампиров, Терёхина, Токарев, 2019), для ее оценки необходимо учитывать ряд ключевых параметров:

3. длина зондирующего импульса
4. частота излучения сигнала
5. скорость буксировки
6. наклонная дальность
7. шаг дискретизации
8. тип зондирующего сигнала
9. диаграмма направленности антенны

Следует различать пространственную разрешающую способность вдоль и поперек профиля, так как на эти величины влияют разные параметры съемки.

Рассмотрим разрешающую способность поперек профиля на примере валуна (Рисунок 10).

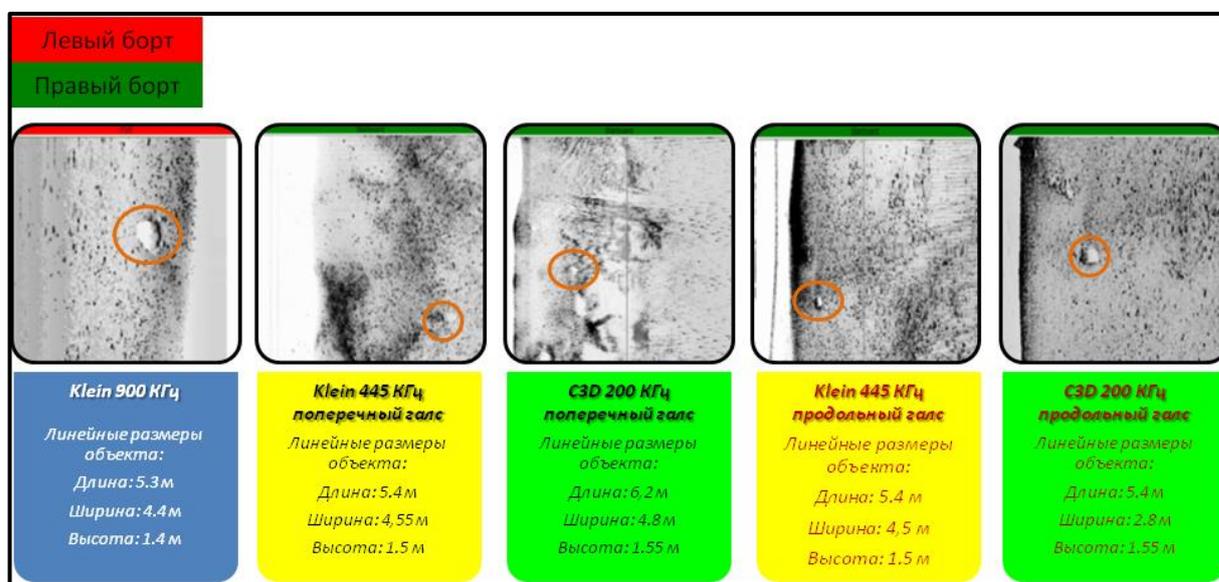


Рисунок 10. Акустическое изображение валуна на дне при съемке гидролокаторами Klein 3900 и C3D на различных частотах и в различных направлениях

На разрешение вдоль профиля оказывает влияние частота излучения сигнала, скорость судна, расстояние до цели.

В ходе анализа данного объекта, были произведены оценки его линейных размеров, а также изменения формы изображения объекта. По результатам выполнения процедуры, сделан следующий вывод: различие в акустической картине наблюдается за счет изменения разрешающей способности, зависящей от рабочей частоты гидролокатора, а также от положения объекта по отношению к положению гидролокатора бокового обзора.

Обращаясь к вопросу об изменении формы исследуемого объекта на акустическом изображении, необходимо отметить, что валун не изометричен по своей форме, следовательно, он не будет иметь одинакового изображения при различном позиционировании гидролокатора бокового обзора, так как изображение объекта формируется с разных его сторон. То есть в данном случае объект может быть идентифицирован по линейным размерам и координатам его местоположения.

Изменение разрешающей способности иллюстрирует тенденция увеличения линейных размеров объекта при понижении частоты зондирующего сигнала и увеличении времени между импульсами. Следовательно, необходимо установить опытным путем линейные размеры объектов, которые могут быть идентифицированы на данных ГЛБО. Регион выбранный для тестов подходит для проведения подобных оценок, так как на морском дне наблюдается значительное количество валунного материала разного размера – результата ледового разноса и эрозии моренных отложений, выходящих на морское дно.

Так на сонограмме, полученной на рабочей частоте 200 кГц возможно различить объекты с площадными размерами от 4 метров. На данных ГЛБО с рабочей частотой 455 КГц выделяются объекты на дне, размеры которых превышают 2.5 метра по одной из осей. Лучшее разрешение позволяют получить данные, полученные с использованием рабочей частоты 900 КГц. На этих данных возможно определение объектов порядка 15 см.

Разрешающая способность поперек профиля зависит от длины волны зондирующего импульса, ширины полосы обзора (расстояния между дискретами записи) и удаленности объекта от профиля (при удалении от прибора полоса озвучивания становится шире). На рисунке ниже рассмотрим два близкорасположенных объекта, зафиксированных одним гидролокатором на разных расстояниях от профиля (Рисунок 11). Данные валуны достаточно хорошо различимы при удалении в 23 метра. Однако, с расстояния до профиля (36 метров) объекты сливаются в один. Таким образом можно сделать вывод, что при закладке заверочных профилей интересующий объект должен быть в центральной трети эффективной полосы обзора одного борта.

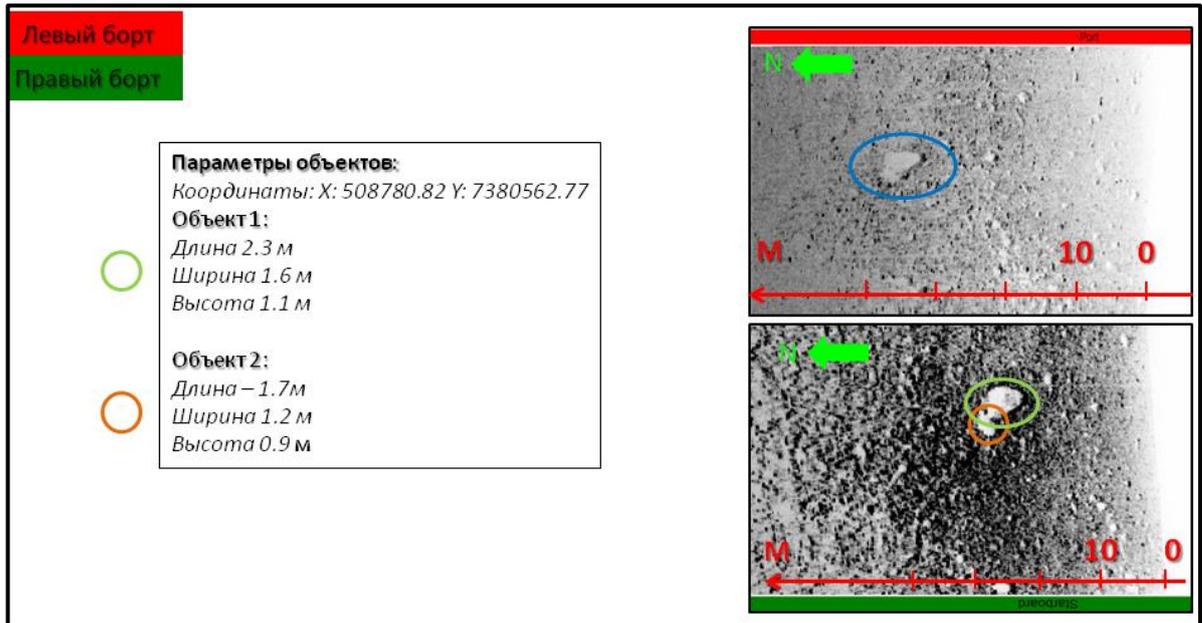


Рисунок 11. Зависимость пространственной разрешающей способности от удаления объектов

При геологической интерпретации данных гидролокации бокового обзора особое внимание уделяют интенсивности обратного рассеяния, однако, существуют нюансы. На частотах, используемых ГЛБО, обратное рассеяние от морского дна может вносить как поверхностный, так и объемный вклад (Рисунок 12).

Часть энергии рассеивается поверхностью морского дна: субгоризонтальными границами, при углах близким к нормальному падению; грубостью и шероховатостью материала при растущем угле падения. Другая часть энергии проникает непосредственно в донные отложения и рассеивается от объема осадков (Blondel, 2009; Jackson, 1992).

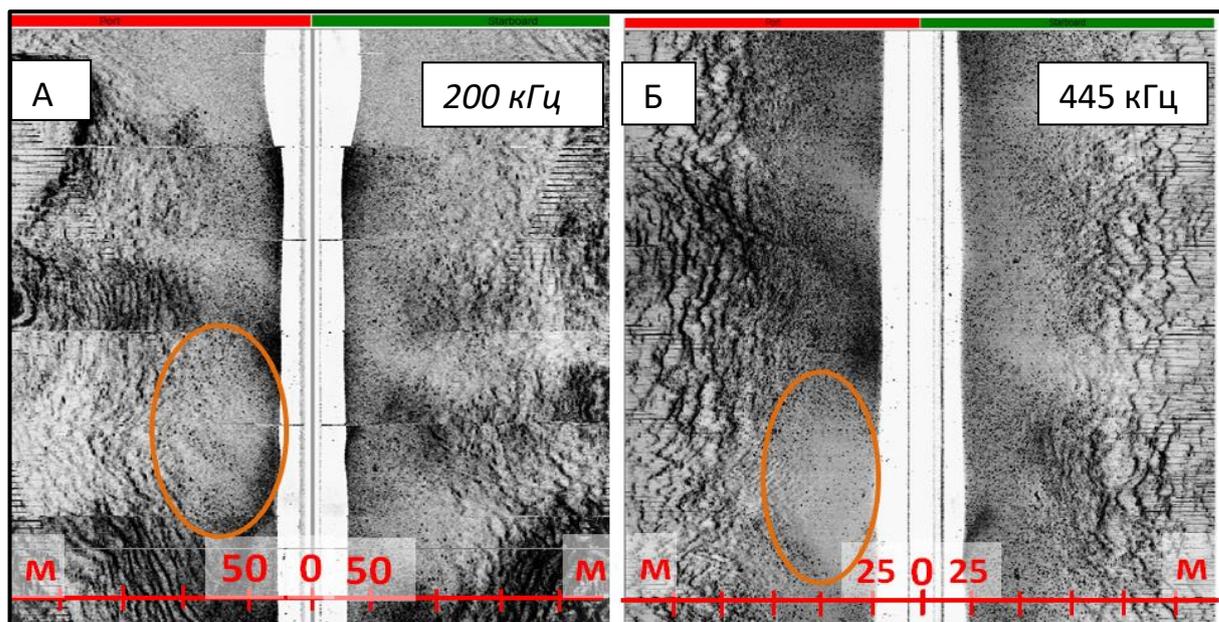


Рисунок 12. Пример объемного рассеяния. На примере низкочастотного гидролокационного изображения (А) в оранжевом овале видны области интенсивного рассеяния. На примере среднечастотного гидролокационного изображения в тех же координатах (Б) в оранжевом овале отсутствуют области интенсивного рассеяния. Этот эффект наблюдается за счет изменения частоты съемки, наличия малой толщины первого слоя и контраста в свойствах нижележащих отложений.

Таким образом, преобладание того или иного процесса определяется величиной угла падения, длиной волны, свойствами донных отложений (Рисунок 12; Таблица 5).

Таблица 5. Гранулометрический состав осадков, создающих вклад в эффекты объемного и поверхностного рассеивания акустической энергии

Осадки		Вышележащие	Подстилающие
Гранулометрический состав в % по массе фракций в мм	>10 мм	0	18.5
	10-5 мм	0	22.9
	5-2 мм	0	3.7
	2-1 мм	0	2.6
	1-0.5 мм	0	6.3
	0.5-0.25 мм	0.3	7.7
	0.25-0.1 мм	8.7	11.8
	0.1-0.05 мм	51.8	17.1
	0.05-0.01 мм	23.9	4.9
	0.01-0.002 мм	8.6	1.4
	<0.002 мм	6.7	3.1

Рассматривая изменение интенсивности акустического изображения при использовании «разночастотных» гидролокаторов, можно сделать предположение о малой мощности верхнего слоя отложений (первые миллиметры – первые сантиметры). Доказательством нашего

предположения является тот факт, что на более низких частотах рассеяние идёт от большей мощности пород, затрагивая нижележащие отложения, которые могут отличаться по составу и свойствам.

Для построения мозаик межпрофильное расстояние выбиралось таким образом, чтобы обеспечить перекрытие поверхности дна соседними противонаправленными галсами не менее 30%. Например, при развертке 150 м шаг между галсами составил 100 м.

Гидролокаторы с низкой (200 кГц) и средней (445 кГц) частотами буксировались при скорости судна от 2 до 4.5 узлов. Буксировка обоих гидролокаторов производилась на высоте над дном, примерно равной 10% от выбранной развертки на борт, что позволило получить оптимальную информативность записи. Буксировка гидролокаторов производилась с кормы судна. Контроль заглубления буксируемого оборудования производился оператором ГЛБО исходя из наблюдаемой на станции сбора акустической картины и показаний однолучевого эхолота.

Тестирование гидролокатора Klein 3900 с частотой 900 кГц происходило в двух режимах: на полигоне 0.5x1 км производилась съемка по сетке галсов для построения мозаики, на большей площади закладывался региональный профиль, проходящий через области, требующие детальной заверки.

Анализируя величину обратного рассеяния, необходимо отметить, что она зависит не только от литологии донных отложений, но и от рельефа дна. Поэтому учитывается рассмотрение данных по двум бортам гидролокатора, а также в продольном и поперечном направлении по отношению к оси пролива Великая Салма.

Основные геологические структуры в проливе Великая Салма имеют субширотное простирание. Планшет акустической мозаики, составленный из профилей продольного направления по отношению к проливу Великая Салма, наилучшим образом подчеркивают рельеф морского дна. Данные ГЛБО, выполненные по поперечным профилям, то есть вкрест простирания основных геологических структур пролива дают нам наилучшее понимание типа осадков.

Таким образом, изменение положения высокоамплитудных областей и акустических теней, расположенных на разных профилях в пределах одного участка, позволяет утверждать, что данные вариации связаны с особенностями рельефа дна. Области с наибольшей величиной обратного рассеяния соответствуют наклонным поверхностям в рельефе дна: склонам ложбин или гряд (Рисунок 13). Интенсивность остальных областей в большей степени связана с литологией донного осадка.

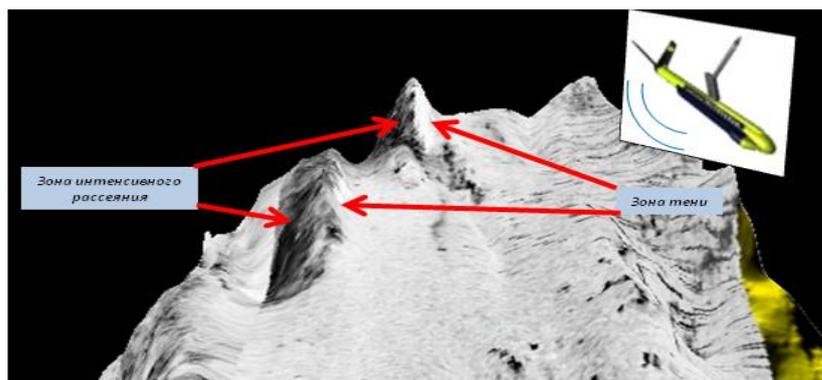


Рисунок 13. Области с наибольшей величиной обратного рассеяния соответствуют наклонным поверхностям в рельефе дна: склонам ложбин или гряд.

По мнению автора параметры должны отвечать следующим требованиям (Таблица 6).

Таблица 6. Требования к составу и параметрам программно-аппаратного комплекса

Модификации	Метод	Диапазон рабочих частот	Глубинность // разрешающая способность в плане	Интервал возбуждения/шаг приема/база приема
МЛЭ	Эхолотирование	100–500 кГц	~0// от 1x1 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 кГц	0,15-0,2см//~1м*	0,1–1 м или 0,05–0,5 сек/0 м/0 м
ГЛБО 2 – среднечастотный	Гидролокация	380-700 кГц	0.2-0,4см//1-2м*	0,1–1 м или 0,05–0,5 сек/0 м/0 м
ГЛБО 3 – низкочастотный	Гидролокация	50-370 кГц	0,4-3 см//1-2м*	0,1–1 м или 0,05–0,5 сек/0 м/0 м
АП	МОВ ЦЛ (Т <sub>0</sub> )	1,5-15 кГц	До 10-50м//0,2-1м	0,1–1 м или 0,05–0,5 сек/0 м/0 м
ВЧ НСП - СУВР	МОВ ЦЛ (Т <sub>0</sub> ) МОВ ОГТ	0,25-2,5 кГц	До 10-50м//0,2-1м	1–2 м или 0,5– сек/ 1–2 м / 16–48 м
НЧ НСП - ССВР	МОВ ЦЛ (Т <sub>0</sub> ) МОВ ОГТ	0,15-1,5 кГц	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.

Первичная обработка гидроакустических данных соответствует стандартам, предложенным в публикациях и закрепленных в своде правил гидрографических наблюдений и инженерных изысканий на континентальном шельфе (СП 504. 1325800.2021, 2021, ГОСТ Р 58743-2019, 2020, Blondel, 2009).

### 3.2 Методика и программное обеспечение для анализа гидроакустических данных<sup>2</sup>

Предлагаемая последовательность анализа данных, полученных по описанной выше методике, при картографировании геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов включает:

- Изучение геологического строения по данным мультимастотного сейсмоакустических наблюдений;
- Анализ данных МЛЭ для выделения геоморфологических элементов мезо- и микрорельефа;
- Интерпретация данных акустического профилирования и гидролокации бокового обзора в трех частотных диапазонах для определения типов донных осадков и изучения литодинамических процессов;
- Комплексование результатов подводных фото- и видеонаблюдений, пробоотбора и лабораторных испытаний с данными дистанционных наблюдений для определения абиотических компонентов подводных ландшафтов.

Данная методика основывается на определении подводного ландшафта и возможностях каждого из методов и содержит классические подходы. При этом интерпретация данных акустического профилирования и гидролокации бокового обзора в трех частотных диапазонах может быть выполнена на качественном и количественном уровне. Под качественной интерпретацией понимается визуальное выделение и идентификация геологических объектов по набору признаков в соответствии с методикой сейсмофациального анализа (Шалаева, Старовойтов, Токарев, 2024). Такой же подход может быть применен к анализу данных МЛЭ и

---

<sup>2</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

- [1]. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.** Атлас по интерпретации геофизических данных для морской практики на Белом море. Учебное пособие. // 2018а. КДУ «Университетская книга» Москва. ISBN 978-5-91304-810-3. 110 с. 6,88 п.л., авторский вклад 25%.
- [2]. **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
- [3]. **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.
- [4]. 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.

ГЛБО (Blondel, 2009). Результатом анализа, как правило, является каталог или атлас типовых объектов (Рисунок 14). Стандартная последовательность действий для такого анализа данных ГЛБО заключается в:

- Пикировке первых вступлений;
- Корректировке за наклонную дальность;
- Амплитудной коррекции;
- Построении мозаики;
- Экспертном выделении однородных областей и отдельных объектов.

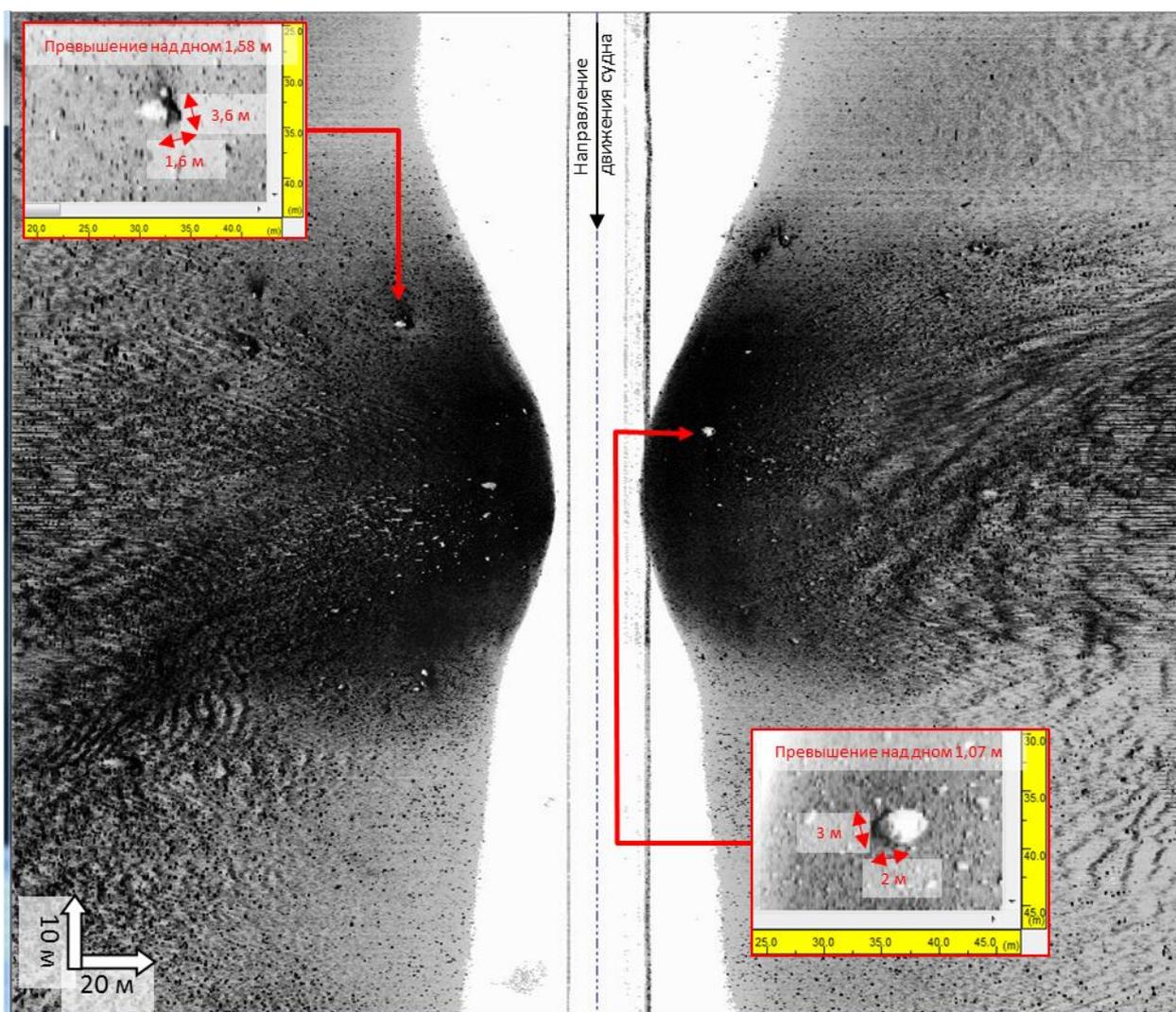


Рисунок 14. В центральной части сонограммы наблюдается положительный рельеф с повышенными значениями интенсивности обратного рассеяния (темные оттенки). Это выход фундамента на поверхность с грубообломочными включениями. В окрестности этого холма интенсивности обратного рассеяния падает до средних и низких значений (серые и светло-серые оттенки), что соответствует литологической смене (Старовойтов и др., 2018а).

В тоже время при количественном подходе часто используются не только первичная информация дистанционных методов, но их количественные трансформанты (атрибуты). По

батиметрии рассчитываются такие атрибуты, как угол наклона, экспозиция (азимут склона), изменчивость рельефа и т. д.; по обратному рассеянию получают: твердость, шероховатость, акустический класс и т. д. (Brown et al., 2012).

Авторская методика получения атрибутов по данным гидролокации бокового обзора в трех частотных диапазонах основана на расчёте статистических параметров распределений случайной величины методами математической статистики (Isachenko et al., 2014, Терёхина и др., 2018). В данной задаче в роли случайной величины выступает значение обратного рассеяния акустического импульса гидролокатора бокового обзора, а статистическим экспериментом является сам эффект обратного рассеяния на неоднородностях. Данные гидролокатора бокового обзора представляют собой двумерный массив, в каждой ячейке которого содержится значение интенсивности обратного рассеяния, образуя генеральную совокупность. Эти значения, при предположении независимости каждого события, являются элементарным исходом рассматриваемого опыта.

Расчет атрибутов данных гидролокации бокового обзора проводится в скользящем окне вдоль галса. С целью исключения необходимости ввода поправок за влияние диаграммы направленности испускаемого импульса, диссипации энергии и геометрического расхождения, центр окна расчёта располагается под постоянным углом. Параметры расчёта (размер окна вдоль галса и в поперечном направлении, шаг между центрами соседних окон, угол приёма от центра окна) задаются пользователем (Рисунок 15). Точки, попавшие в границы выбранного окна, являются элементарным исходом статистического эксперимента и образуют выборочную совокупность, которая в дальнейшем подвергается исследованию. Предполагается, что в рамках одного окна случайная величина независима и подчиняется единственному закону распределения. Благодаря этому предположению возможно использование статистических параметров для описания закона распределения данной случайной величины.

Для данных исследований ширина окна была выбрана равной 15x15, исходя из представления о площади захвата подводной фотографии ландшафтов. Шаг по профилю равен 10 м для перекрытия на треть соседних окон расчёта. Угол расчёта был выбран, исходя из представлений о величине развёртке записи и характере рельефа, и составил 45 градусов.

Развёртка записи гидролокатора бокового обзора задаётся перед осуществлением съёмки, таким образом, её можно считать постоянной вдоль всего галса. Расстояние от излучающего устройства до дна может меняться в широких пределах по различным технологическим причинам. В случае значительного увеличения этого расстояния при определённых углах положение окна расчёта может выходить за границы записи, так как при неизменной развёртке уменьшается количество углов, под которыми регистрируются рассеянные назад акустические

сигналы. В таком случае положение окна корректируется при незначительных первоначальных смещениях за границы регистрации. Если же выбранный угол для расчета атрибутов выходит за границы диапазона углов, под которыми регистрируется полезный сигнал, то расчет атрибута для соответствующей области сонограммы не производится.

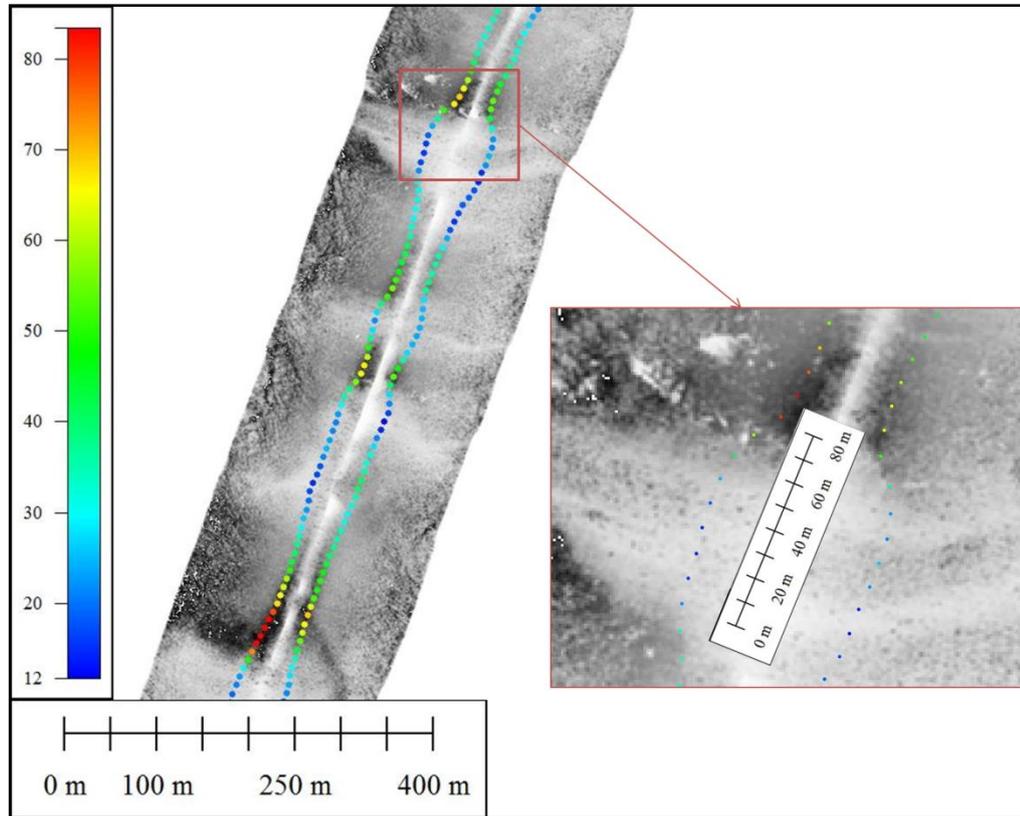


Рисунок 15. Пример положения центров окон расчёта при угле 45 градусов, размере окна 15x15 м, шаге по профилю 10 м. Цветная шкала соответствует атрибуту «Средняя квадратичная амплитуда» (y.e.) (Терёхина и др., 2021)

Описать закон распределения случайной величины можно с помощью графического изображения – гистограммы, – или же с помощью статистических выборочных характеристик. При расчетах были использованы такие эмпирические выборочные характеристики, как среднее арифметическое, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса и корень из выборочного центрального момента 2-го порядка. А также мода и медиана этой случайной величины. Данные характеристики рассчитывались по следующим формулам.

Предположим, что имеется выборка порядка  $n$ :  $x_1, x_2, \dots, x_n$

Выборочное среднее

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Выборочное среднеквадратическое отклонение

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \quad (2)$$

Коэффициент асимметрии

$$Skew = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x}_n)^3}{((S_n)^2)^{3/2}} \quad (3)$$

Коэффициент эксцесса

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x}_n)^4}{((S_n)^2)^2} - 3 \quad (4)$$

Мода – это наиболее часто встречающееся число в выборке, а медиана - число, которое делит выборку, отсортированную в порядке возрастания, пополам (на две равные части по объёму частостей) (Рисунок 16).

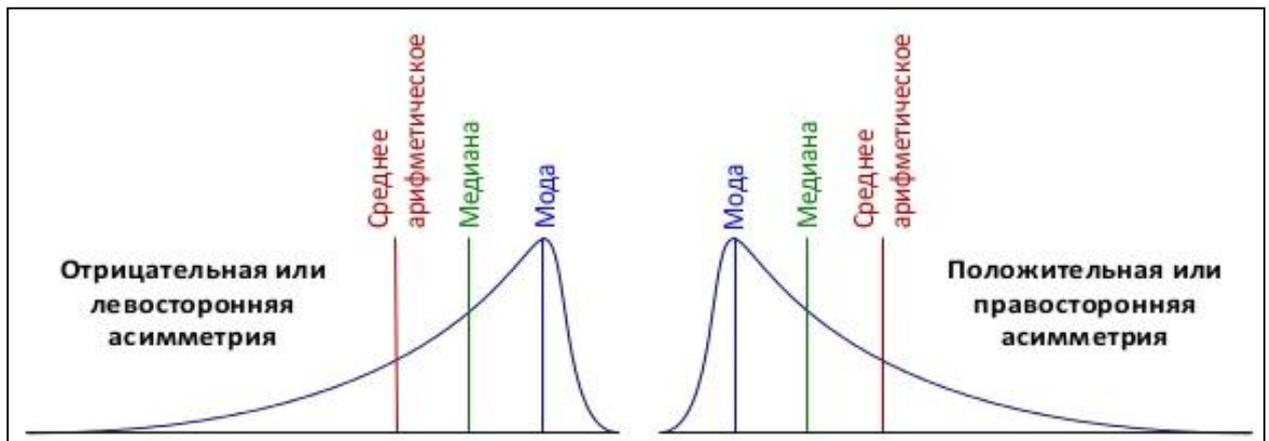


Рисунок 16. Иллюстрация, поясняющая смысл атрибутов медиана, мода, среднее арифметическое и асимметрия.

Эмпирическая гистограмма и эмпирические статистики распределения случайной величины являются разными способами описания одного и того же распределения случайной величины, поэтому, анализируя статистики в автоматическом режиме, можно оценить характер функции распределения и, в последствии, коррелировать различные законы распределения с определенными свойствами грунта.

Каждому положению окна сопоставляется точка на координатной оси и рассчитанным атрибутам присваиваются координаты. После этого строятся карты по каждому из атрибутов гидролокационной съемки.

Для перехода от характера распределения значений атрибутов к свойствам донного осадка необходимо понимать физический смысл каждого из атрибутов. Следует учесть, что отдельное рассмотрение одного атрибута имеет смысл только при предположении о прочих равных. Речь идёт о том, что связывать изменения рассматриваемого параметра с характеристиками среды правомерно лишь в том случае, если на всём изучаемом участке другие атрибуты постоянны.

Таким образом, по атрибутам среднее арифметическое, мода, медиана, коэффициент асимметрии можно судить о гранулометрическом составе осадков, а по коэффициенту эксцесса и среднеквадратическому отклонению – об однородности (Терёхина и др., 2018). Ниже приведено описание каждого атрибута и его физического смысла в простейшем случае – при неизменных остальных параметрах.

#### **Среднее арифметическое (ArMean)**

Показывает среднее значение обратного рассеяния на площадке, отражающее среднюю размерность зёрен донных осадков. Если предположить, что в пределах площадки расчёта осадок однородный, то по данному атрибуту можно сравнить размерность зёрен на соседних площадках.

#### **Коэффициент асимметрии (Skewness)**

Показывает смещение пика распределения относительно математического ожидания, асимметрию распределения случайной величины. Положительные значения свидетельствуют о преобладании слабой интенсивности обратного рассеяния в пределах площадки расчёта, то есть о тонкозернистости отложений. Отрицательные значения показывают высокие значения рассеяния, свидетельствующие о грубозернистости донного осадка или неровностях рельефа дна.

#### **Коэффициент эксцесса (Kurtosis)**

Показывает меру остроты пика распределения случайной величины. Изменяется от -3 до бесконечности. Нулевое значение соответствует нормальному распределению. Отрицательные значения соответствуют узкому пику распределения, что свидетельствует об однородности осадка. Положительные значения возникают при широком и плавном распределении, что отражает широкий спектр размерности зёрен донного осадка.

#### **Среднеквадратическое отклонение (StErr)**

Показывает разброс значений представленного множества от среднего арифметического. Чем меньше значение отклонения, тем сильнее элементы множества сгруппированы вокруг среднего значения, то есть осадок более однородный. Чем больше отклонение, тем более неоднородный осадок или неровный рельеф.

### **Медиана (Mediana)**

Медиана – значение варьирующего признака, который делит ряд распределения на две равные части по объёму частот. В случае наличия отскачивших значений корректнее показывает среднее значения распределения, нежели среднее арифметическое. Отражает среднюю размерность осадка на площадке расчёта атрибута.

### **Мода (Moda)**

Показывает положение пика распределения, наиболее часто встречающееся значение интенсивности обратного рассеяния. Следовательно, показывает размерность преобладающего осадка. Низкие значения свидетельствуют о наличии большого количества тонкозернистых осадков: илов, алевро-пелитов, пелитовых миктитов, песчаных пелитов. Средние значения – алевролиты, алевролитовые миктиты и др. Высокие значения – пески, гравийно-галечные высыпки, выходы кристаллических пород.

### **Мода – среднее арифметическое (Moda – ArMean)**

Разность положительная – асимметрия сдвинута вправо, преобладают грубозернистые осадки. Разность отрицательная – асимметрия сдвинута влево, преобладают тонкие осадки. Чем больше модуль разности, тем сильнее сдвинут пик распределения в грубозернистые или тонкозернистые осадки. Маленькие значения, близкие к нулю, - распределение близко к нормальному, осадок смешанный, преимущественно среднезернистый

### **Медиана – среднее арифметическое (Mediana – ArMean)**

Разность положительная – асимметрия сдвинута вправо, преобладают грубозернистые осадки. Разность отрицательная – асимметрия сдвинута влево, преобладают тонкие осадки. Чем больше модуль разности (при одинаковой моде), тем более островершинным является распределение, осадок более однородный

Для корректной интерпретации рассчитанных атрибутов необходимо их совместное сравнение. Благодаря одновременной оценке коэффициента асимметрии и среднего арифметического или медианы мы можем различить осадок со слабой интенсивностью обратного рассеивания, на котором расположены отдельные объекты с высокой интенсивностью обратного рассеивания. А также осадок с сильной интенсивностью обратного рассеяния, на котором расположены отдельные элементы той же породы. В первом случае осадок будет характеризоваться низкими значениями среднего арифметического, медианы, моды и положительными значениями коэффициентами асимметрии. Второй тип осадка характеризуется высокими значениями среднего арифметического, медианы, моды и отрицательными значениями коэффициента асимметрии.

Коэффициент эксцесса характеризует крутость закона распределения, а стандартное отклонение меру разброса значений относительно среднего. С помощью одновременного анализа этих параметров мы можем оценить характер сортировки грунта. При низких значениях коэффициента эксцесса и среднеквадратического отклонения мы можем сказать, что осадок однороден. При больших значениях среднеквадратического отклонения и низких значениях эксцесса мы можем полагать, что на осадке расположено большое количество мелких объектов, создающих тень. В случае больших значений коэффициента эксцесса и малых значениях среднеквадратического отклонения (относительно ср. кв. откл. при осадке с большим количеством камней) мы можем сказать, что на осадке расположен один или несколько относительно больших объектов, которые создают тень.

Совместное рассмотрение большого количества атрибутов является очень трудоёмким процессом, в связи с чем возникает необходимость применения автоматической кластеризации.

Анализ гидроакустических данных заключается в следующем:

1. Исходные данные должны быть использованы из полевых материалов или базы данных;
2. По данным батиметрии рассчитываются следующие атрибуты: глубина, угол и азимут наклона поверхности;
3. По данным среднечастотного ГЛБО рассчитываются атрибуты: среднее арифметическое, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, среднеквадратическое отклонение, медиана, мода, разница между модой и средним, разница между медианой и средним;
4. Выбор окна и шага расчета;
5. Загрузка атрибутов в базу данных для последующего анализа;
6. Подготовка рассчитанных атрибутов к кластерному анализу:
  - a. исследование взаимной зависимости переменных, удаление отскоков.
  - b. Нормализация атрибутов в соответствии с экспертной оценкой литологии и шероховатости поверхности для данного региона;
  - c. Исследование возможности совместного использования продольных и поперечных профилей
    - Сравнение попарных корреляционных зависимостей атрибутов, посчитанных отдельно по данным каждого направления, между собой, а также с кросс-плотами для единовременного использования данных по обоим направлениям.

- Сравнение значений атрибутов, рассчитанных по данным гидролокации бокового обзора продольного и поперечного направления, в точках пересечений профилей.
- Сравнение гистограмм распределения интенсивности обратного рассеяния на одних и тех же площадках для продольных и поперечных направлений.

d. Оценка вклада каждого атрибута методом главных компонент и экспертом;

#### 7. Проведение кластерного анализа по рассчитанным атрибутам;

Для количественного анализа гидроакустических в рамках предложенной технологии под руководством и участия автора были разработаны специализированные программные средства:

- база данных гидроакустических исследований (2020622371, 2020);
- модуль расчета атрибутов (2020613109, 2020);
- интеллектуальную систему сегментации картографических результатов морских площадных геофизических исследований «ScanGMapping» (2020660123, 2020).

База данных (БД) обеспечивает целостность, непротиворечивость и безопасность данных и вспомогательной информации, а также удобный доступ через веб-интерфейс. БД осуществляет хранение, накопление и гибкий поиск данных гидроакустических исследований. Область применения: проведение инженерных изысканий, экологических и геофизических исследований на акваториях.

Модуль расчета атрибутов предназначен для проведения обработки и геостатистического анализа данных гидрографических изысканий. Функциональные возможности программы: визуализация данных гидролокации бокового обзора (ГЛБО), обработка данных гидрографического промера с помощью многолучевого эхолота (МЛЭ), расчёт атрибутов данных ГЛБО и МЛЭ, классификация атрибутов ГЛБО (Терёхина и др., 2021).

Программа «ScanGMapping» предназначена для проведения семантической сегментации картографических результатов морских площадных акустических исследований. Функциональные возможности: визуализация и семантическая сегментация картографических материалов гидрографического промера глубин, гидролокационных исследований в формате Geo Tiff; создание, редакция и анализ обучающей коллекции классов для проведения сегментации.

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

В пределах Кандалакшского залива распространены фиардово-шхерные берега (Зенкович, 1938, Медведев 1957, Каплин, 1962, Шевченко, 1999). Губы Кандалакшского залива: Порья губа, Чупа, пролив Великая Салма, включая губу Ругозерская, а также Нильменско-Чернореченская приустьевая местность, схожи по своему происхождению, строению и ландшафтным особенностям (Рисунок 17). Задачами представленной работы являлись апробация технологии картирования и определение геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов участков Кандалакшского залива Белого моря по комплексу гидроакустических методов на примере типового залива.

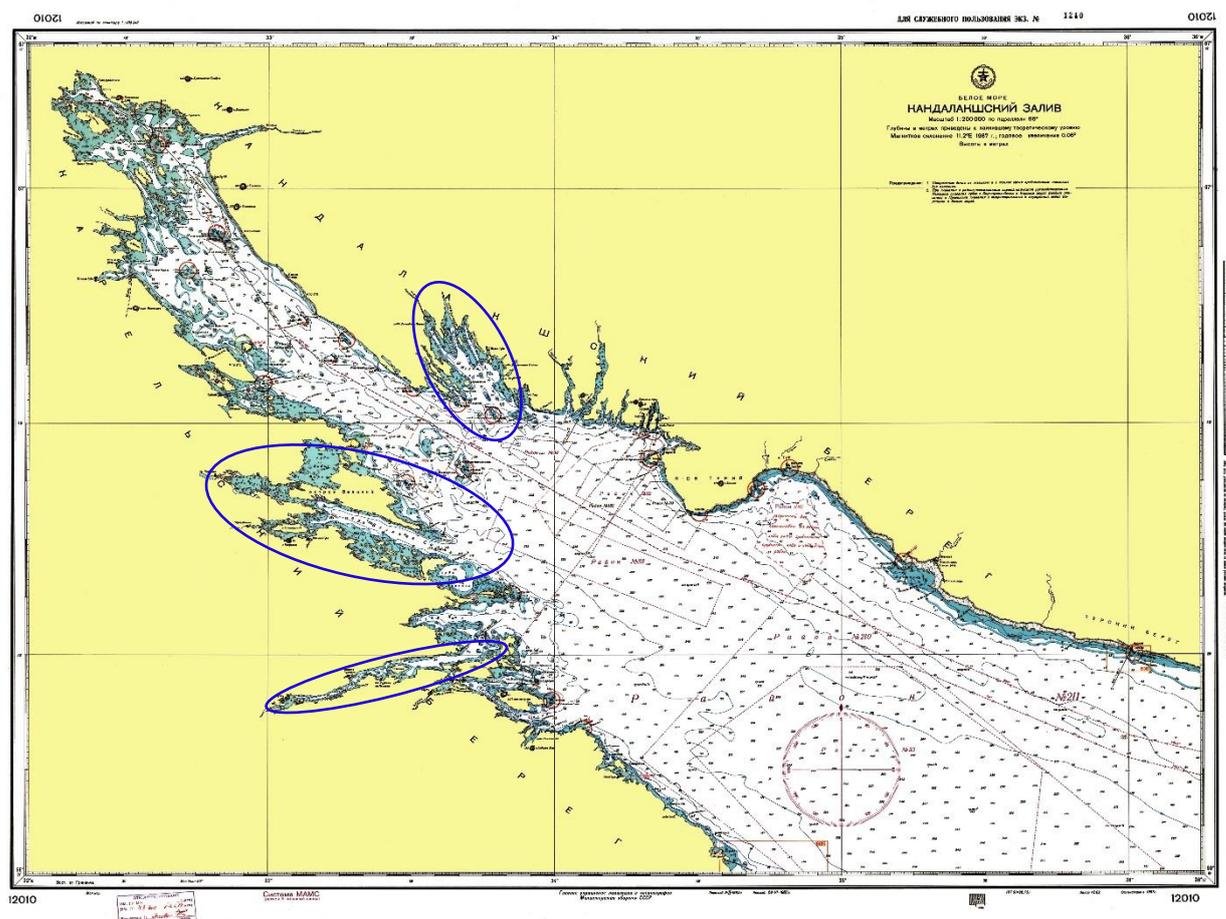


Рисунок 17. Морская карта. Кандалакшский залив Белого моря (Морская карта..., 1987). Синие овалы отмечают губы второго порядка центральной части Кандалакшского залива

В качестве тестового полигона был выбран пролив Великая Салма (Рисунок 18), в пределах которого с 2008 года по 2024 года в рамках научно-исследовательских работ и учебно-научных практик автором были выполнены основные этапы исследований.

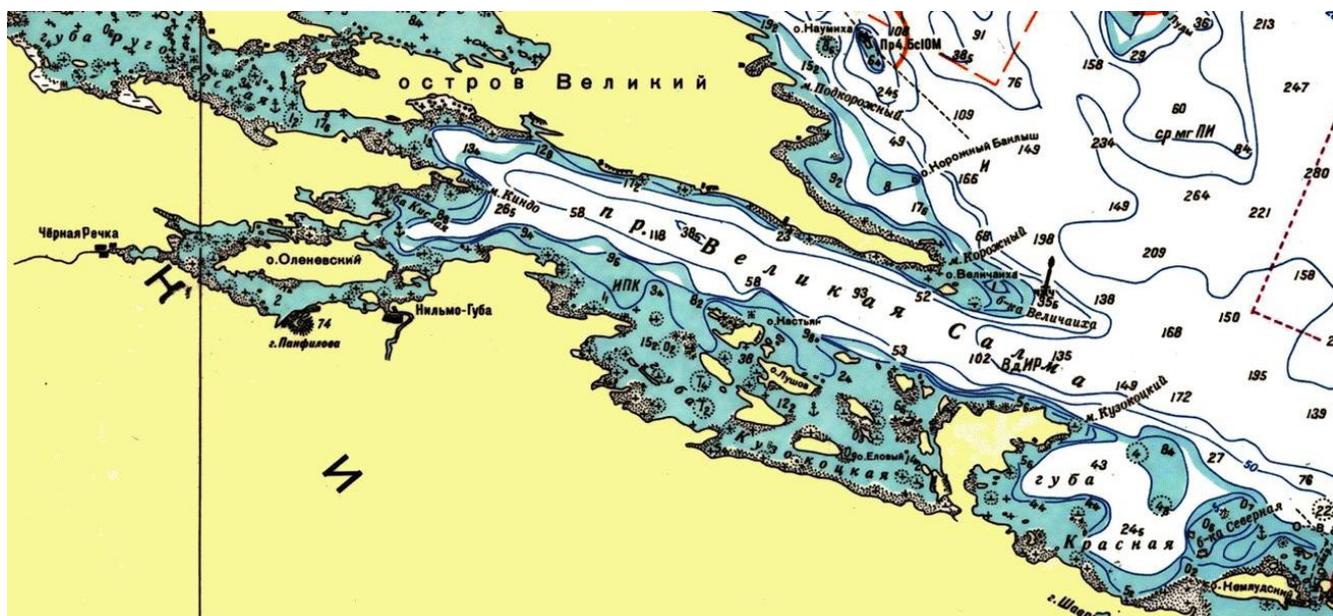


Рисунок 18. Пролит Великая Салма на увеличенном фрагменте морской карты. Кандалакшский залив Белого моря (Морская карта..., 1987)

Пролит Великая Салма длиной около 25 км, шириной 0.6-8 км и глубиной до 125 м – часть фиарда (по классификации Каплин, 1962, Bird, 2008), типичного для Кандалакшского залива (Сафьянов, Соловьева, 2005). Салма отделена порогами от губ Ругозерская и Нильма, а западнее участка исследований открывается в Кандалакшский залив.

Рельеф пролива является структурно-предопределенным, обусловленным разновысотным положением тектонических блоков и в дальнейшем был моделирован процессами ледниковой экзарации и аккумуляции, гляциоизостатического поднятия и субаквальных гидрогенных и гравитационных процессов.

Дегляциация района произошла ~12.5 Ка ВР (Astakhov et al., 2016). Практически в то же время (13.8–12.4Ка ВР) сюда проникли морские воды (Kolka et al., 2005). На дне пролива накапливались ледниково-морские, а затем морские осадки (Государственная..., 2012). На глубинах до 40-50 м на поверхности дна или под чехлом морских осадков фиксируется тонкий слой перлювия песчано-гравийной размерности, сформировавшийся в результате размыва отложений при эвстатических колебаниях уровня моря. Берега пролива испытывали гляциоизостатическое поднятие со скоростью от 9-13 мм/год в раннем голоцене до 3-6 мм/год в последние столетия (Романенко, Шилова, 2012, Dreßler et al., 2009). Скорость поднятия отдельных блоков отличалась на 2-3 мм/год (Романенко, Шилова, 2012, Репкина, Романенко,

2016). Высокая до настоящего времени сейсмическая активность (*Балуев и др., 2009*) провоцирует гравитационные процессы на берегах пролива и крутых склонах на его дне (*Колюбакин и др., 2016*).

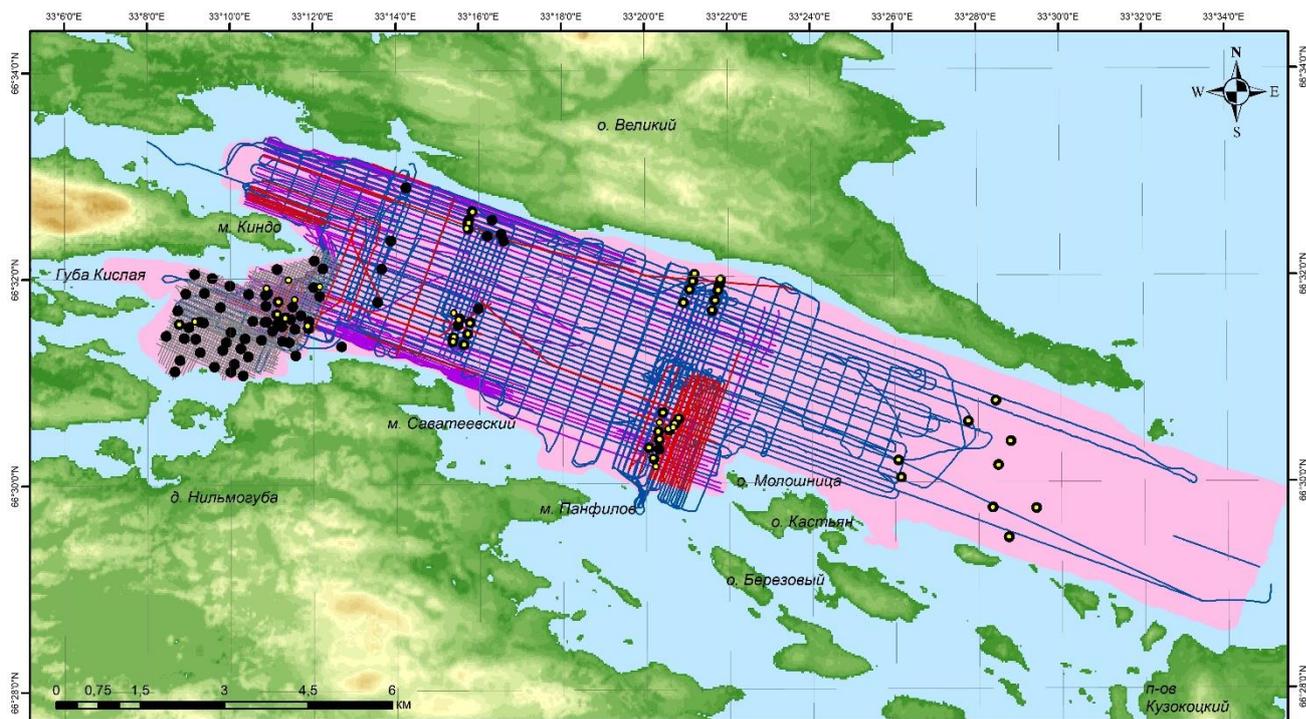
Современную гидродинамику пролива глубже зоны воздействия волн (5-10 м), определяют приливные течения скоростью до 0.5 м/с. Приливное течение входит в Салму с юго-востока, и идет вдоль северного берега на северо-запад. Отливное следует вдоль оси пролива в обратном направлении. Величина прилива - 2 м в сизигию и 1 м в квадратуру. Припайный лед достигает мощности 0.5-0.7 м, сохраняется с декабря-января до начала мая. Пресный сток трех небольших рек, поступающий в губы Ругозерская и Нильма, не влияет на донные осадки и бентос Салмы. Летняя температура на поверхности воды изменяется от 12-13°C в холодные годы до 18-19° в теплые годы, а положение изотермы 0° - от 40 до 100 м. Соленость варьирует от 22 до 25 пс. Толщина поверхностного однородного слоя составляет 5-20 м (*Пантюлин, 2012*).

#### 4.1 Материалы и методы

Базовый этап исследований был выполнен на полигоне «пролив Великая Салма» в 2016 (*Выполнение работ...*, 2017) и 2021 гг, 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 19)



Условные обозначения

- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| — Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) | ○ Подводная фото- и видеосъемка |
| — НСП и Гидролокационная съемка (низкочастотная)      | ● Отбор проб донных отложений   |
| — Гидролокационная съемка (среднечастотная)           | ■ Батиметрическая съемка        |
| — Гидролокационная съемка (высокочастотная)           |                                 |

Рисунок 19. Карта фактического материала

Данные мультиспектральных сейсмоакустических исследований были взяты из архивных материалов (Кубышкина и др., 2012, Сорокин и др. 2009, Токарев, 2016).

При анализе рельефа берегов была использован фрагмент глобальной цифровой 3D-карты «ALOS World 3D» разработанной Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) ([https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index_e.htm)).

*Непрерывное сейсмоакустическое профилирование* выполнялось с помощью многофункционального комплекса Teledyne Benthos C3D+SBP с центральной частотой 2-7 кГц.

Съемка проводилась с борта судов НИС «Студент МГУ» и НИС «Профессор Зенкевич». Забортное оборудование буксировалось с А-рамы с кормы судна на стальном тросе с использованием судовой лебедки. Заглубление контролировалось оператором съемки при помощи длины вытравленного троса. Длина вытравленного троса непрерывно считывалась при помощи кабель-счетчика, установленного на А-раме. Значение оффсета оборудования передавалось в навигационное ПО и присваивалось акустическим данным.

Обработка данных производилась по стандартным методикам в программном обеспечении RadexPro Professional 2016.4 (Деко-Геофизика СК). Глубинность полученных данных достигает 20 м по грунту при разрешающей способности до 20 см (Рисунок 20).

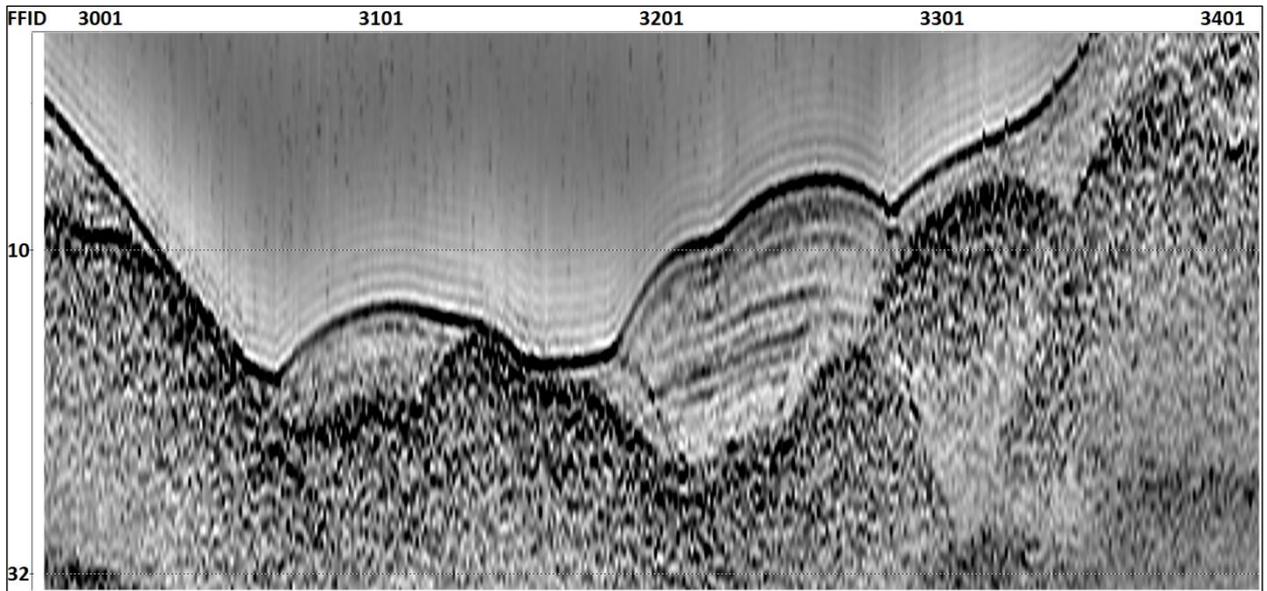


Рисунок 20. Фрагмент полевых данных НСП

Батиметрическая съемка выполнена с помощью МЛЭ Reson Seabat 7125 SV2, установленным на забортную штангу поворотного типа с правого борта НИС «Профессор Зенкевич». Для устранения вибрации забортной штанги на ходу судна, в следствии гидродинамических воздействий, штанга растягивалась тремя оттяжками: носовой, кормовой и подкильной. Непосредственно в районе работ, перед началом площадного обследования, на ежедневной основе, выполнялась калибровка МЛЭ с целью точного определения углов установки между осями МЛЭ и осями ГК и ДПП, а также наличие и величину временной задержки прихода сигнала МЛЭ относительно сигнала системы позиционирования.

Измерение профиля скорости распространения звука в воде производилось с периодичностью не реже одного раза в 6 часов, а также после возобновления работ после их прерывания.

Данные собирались в программном обеспечении Fugro Starfix 10.1 SP4. Указанное программное обеспечение позволяло в режиме реального времени контролировать настройки оборудования, качество, получаемых навигационных и батиметрических данных, качество судовождения, полноту покрытия и, при необходимости, оперативно вносить коррективы в процессе работ.

По итогам съемки построена цифровая модель рельефа дна (ЦМР) дна с размером ячейки 2x2 м для всей площади полигона (Рисунок 21).

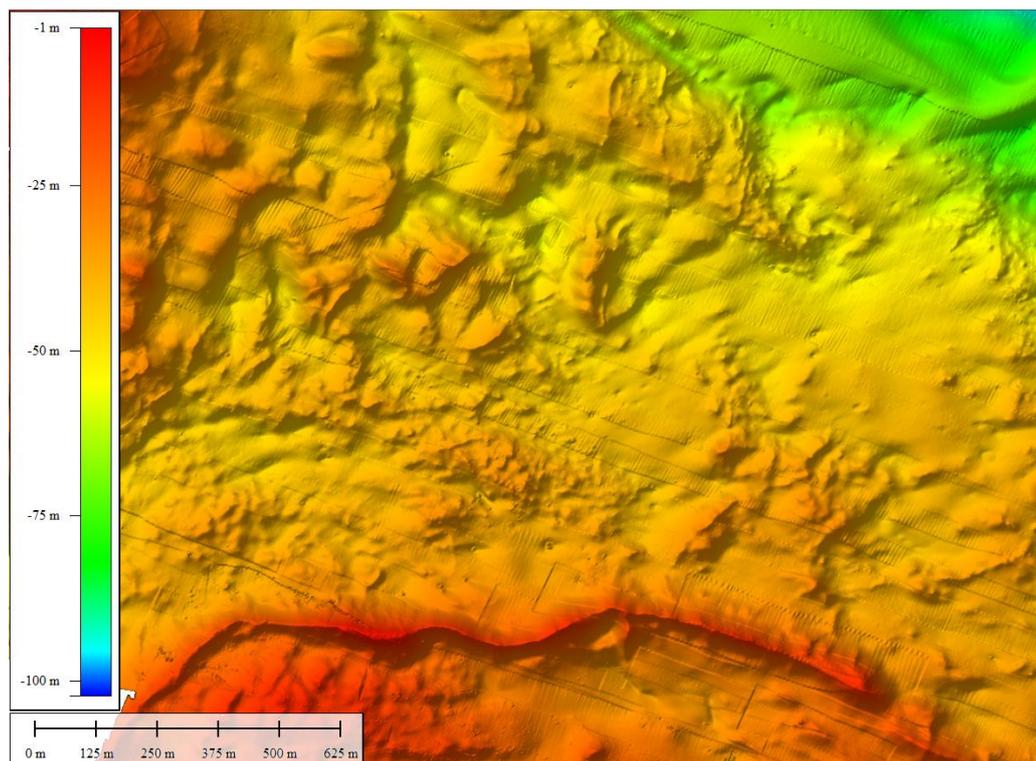


Рисунок 21. Фрагмент изображения цифровой модели рельефа дна способом аналитической отмывки

Гидролокация бокового обзора была выполнена в трехчастотном варианте с помощью буксируемых приборов: Teledyne Benthos C3D+SBP с частотой 200 кГц (низкочастотный вариант) и Klein 3900 с частотами 445 кГц (среднечастотный вариант) и 900 кГц (высокочастотный вариант) с маломерных судов НИС «Студент МГУ» и НИС «Профессор Зенкевич».

Съемка проводилась по заранее запланированной системе продольных и поперечных галсов. Позиционирование судна на галсе проводилось с использованием GPS системы Trimble R7, функционирующей в дифференциальном режиме RTK. Базовая станция RTK была установлена на возвышенности на полуострове Киндо близ ББС МГУ. Место установки базовой станции было выбрано с тем условием, чтобы радиус вещания дифференциальной поправки покрывал весь планируемый полигон съемки ГЛБО.

Буксировка ГЛБО Teledyne Benthos C3D производилась с кормы судна с использованием для спуска/подъема заборного оборудования судовой лебедки. Контроль заглубления буксируемого оборудования производился оператором ГЛБО исходя из наблюдаемой на станции сбора акустической картины.

Параметры регистрации, выбранные для ГЛБО Teledyne Benthos C3D+SBP приведены ниже (Таблица 7).

Таблица 7. Параметры регистрации для ГЛБО Teledyne Benthos C3D+SBP

Параметр	Значение
Рабочая частота, кГц	200
Наклонная дальность, м	100 - 500
Длина вытравленного кабеля, м	2 - 100
Формат записи данных	.XTF

Буксировка ГЛБО Klein 3900 производилась с кормы судна в случае автономной работы гидролокатора и с поворотного выстрела по левому борту (Рис. 6.4.3) судна в случае совместной работы двух гидролокаторов.

Работы проводились при скорости судна от 2 до 4.5 узлов. Параметры регистрации, выбранные для ГЛБО Klein 3900 приведены в таблице (Таблица 8).

Таблица 8. Параметры регистрации для ГЛБО Klein 3900

Параметр	Значение
Рабочая частота, кГц	900/450
Наклонная дальность, м	50-150
Длина вытравленного кабеля, м	1 - 100
Формат записи данных	.XTF

Обработка данных ГЛБО проводилась в ПО SonarWis 7. по стандартному графу. По итогам гидролокационной съемки были составлены мозаики ГЛБО по продольным и поперечным галсам (Рисунок 22).

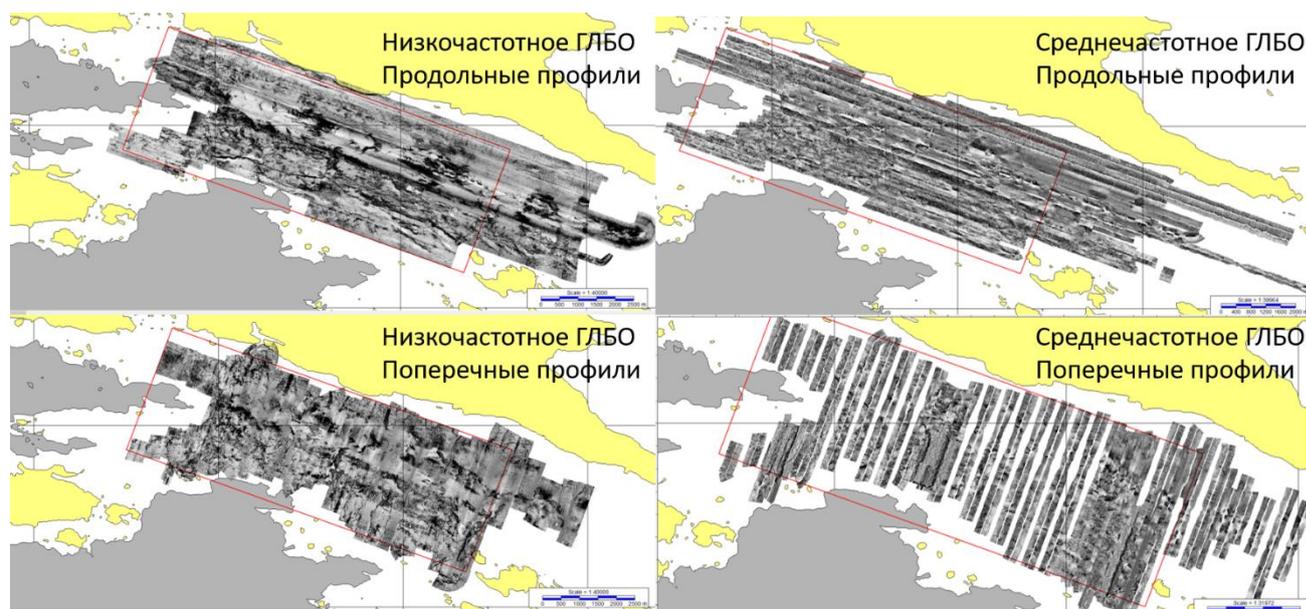


Рисунок 22. Мозаики низкочастотного и среднечастотного ГЛБО

Атрибуты по данным гидролокаторов C3D и Klein (на частоте 445 кГц) были рассчитаны в продольном и поперечном направлении с помощью авторского программного обеспечения (2020613109, 2020). В результате с помощью базы данных (2020622371, 2020) построено 12 карт

атрибутов: ArMean (C3D), StErr (C3D), Kurtosis (C3D), Skewness (C3D), Moda-ArMean (C3D), Mediana-ArMean (C3D), ArMean (Klein), StErr (Klein), Kurtosis (Klein), Skewness (Klein), Moda-ArMean (Klein), Mediana-ArMean (Klein) (Рисунок 23).

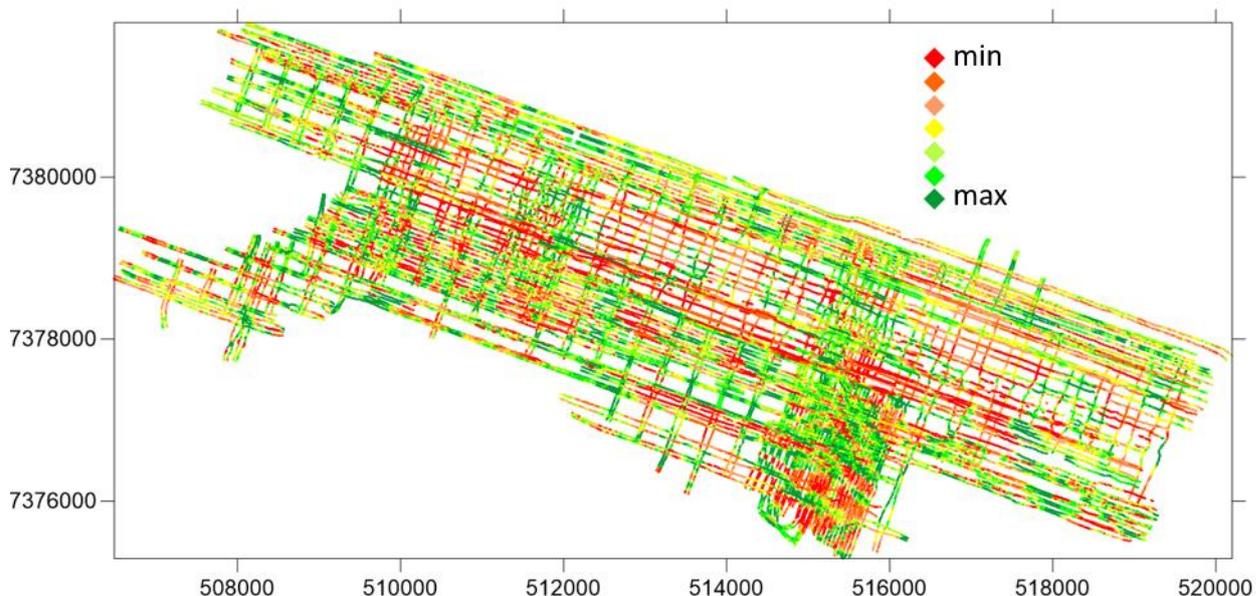


Рисунок 23. Карта атрибута ArMean, рассчитанного по данным гидролокатора бокового обзора C3D 200 кГц (Цветом показано значение атрибута).

На основе этих результатов в 2016, 2021 и 2024 гг. были выбраны точки для отбора проб и подводных визуальных наблюдений.

Геологический пробоотбор осуществлялся пробоотборником Haps-corer (КС Denmark) с металлическим стаканом (Рисунок 24). В случае повышенной плотности донных осадков отбор проб проводился дночерпателем Day Grab Sampler (КС Denmark) с площадью отбора 0,1 м<sup>2</sup>. В 2016 году 47 точках, отобрано 237 образцов проб. В 2021 году по той же методике были опробованы 43 точки между мысом Киндо, губами Кислая и Черная, Крестовыми островами. В 2024 году с помощью дночерпателя Ван-Вина с площадью отбора 0,1 м<sup>2</sup> были отобраны 9 проб в восточной части пролива. Гранулометрический анализ донных проб проводился по (ГОСТ..., 2015).



Рисунок 24. Измерение температуры и фотодокументация керна

Визуальные обследования в 2016 и 2021 гг проводили с помощью ТНПА РБ «Мираж», в 2024 году съемка проводилась буксируемой подводной видеосистемой разработки ООО «ЦМИ МГУ». Точки натуральных наблюдений выбирались для заверки данных, получаемых с использованием пробоотбора. На плотных и каменистых грунтах, где пробоотбор дночерпателем невозможен, также была выполнена видеосъемка. Длина каждой записи составляла не менее 10 минут. Для обработки записи использовался стандартный протокол (Мокиевский, 2015), включающий покадровые (или по фрагментам протяженностью 10 сек) описания типа грунта, биотопа и его внутреннюю мозаичность.



Рисунок 25. Фотографии дна, сделанные ТНПА РБ «Мираж». А - станция 1-4 (илистый грунт), В – станция 1-3 (песчаный грунт), С – станция 1b-1 (каменистый грунт)

Количественный анализ гидроакустических данных был проведен по авторской методике, описанной в главе 3.2. Подготовка данных для кластерного анализа заключалась в следующем:

- Исследование взаимной зависимости переменных, удаление отскоков.

Обнаружены и выведены из рассмотрения отскачившие значения (5,5% от общего числа точек для Klein, 7% - для СЗД). Анализ матриц взаимных корреляций показал, что атрибуты

Moda, Mediana и ArMean для оставшихся точек характеризуются высокой взаимозависимостью, в связи с чем их совместное рассмотрение не информативно. Для дальнейшей работы был выбран атрибут ArMean и рассчитаны атрибуты Mode-ArMean и Mediana-ArMean.

- Нормализация атрибутов;

В процессе нормировки значения атрибутов в каждой точке были заменены на нормированные значения, рассчитанные по формуле:

*Нормализованное значение = (Исходное значение - Среднее для атрибута)/Стандартное отклонение*

- Исследование возможности совместного использования продольных и поперечных профилей;

В результате сравнения значений и гистограмм распределения интенсивности обратного рассеяния на одних и тех же площадках сделан вывод, что при сильных неоднородностях рельефа дна необходим отдельный анализ данных продольного и поперечного направления (Рисунок 26, Рисунок 27).

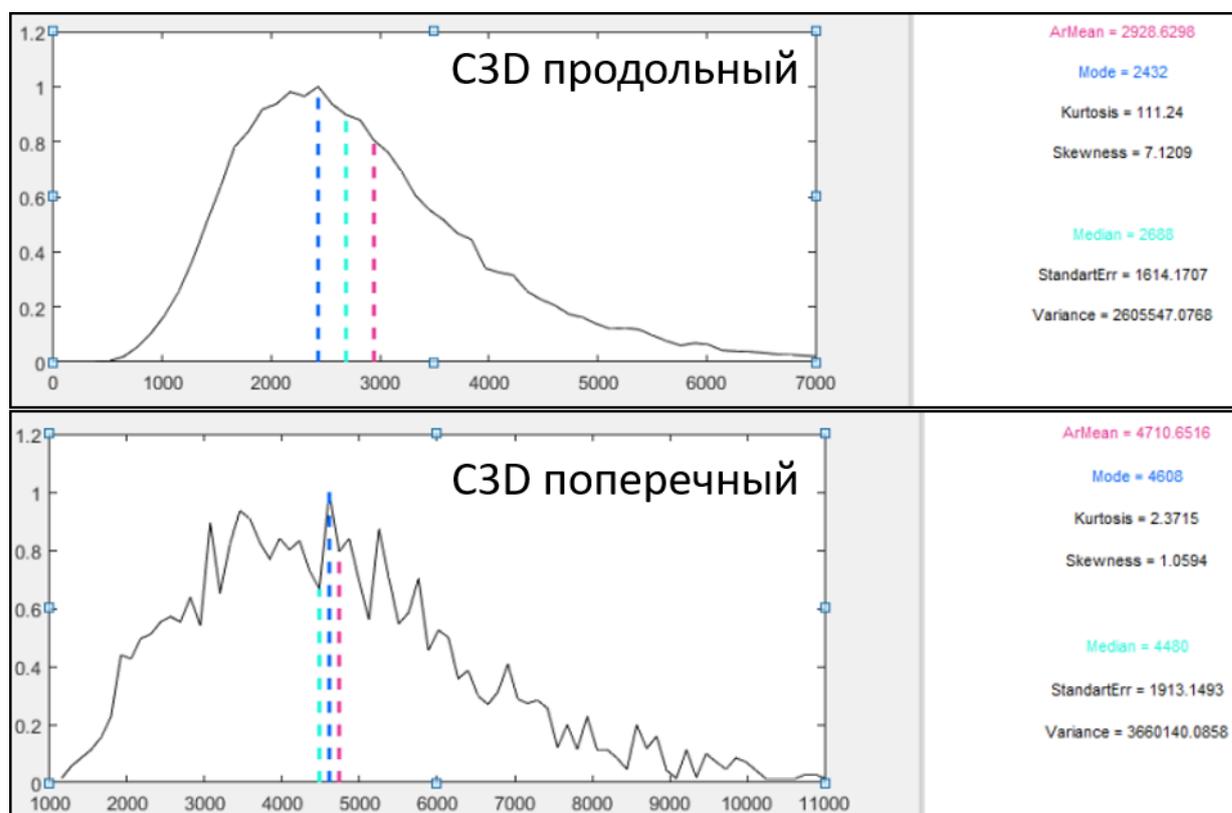


Рисунок 26. Гистограмма распределения интенсивности обратного рассеяния в окне 50x50 м на данных гидролокатора C3D (200 кГц). Участок выхода коренных пород. Профили поперечного (снизу) и продольного (сверху) направлений.

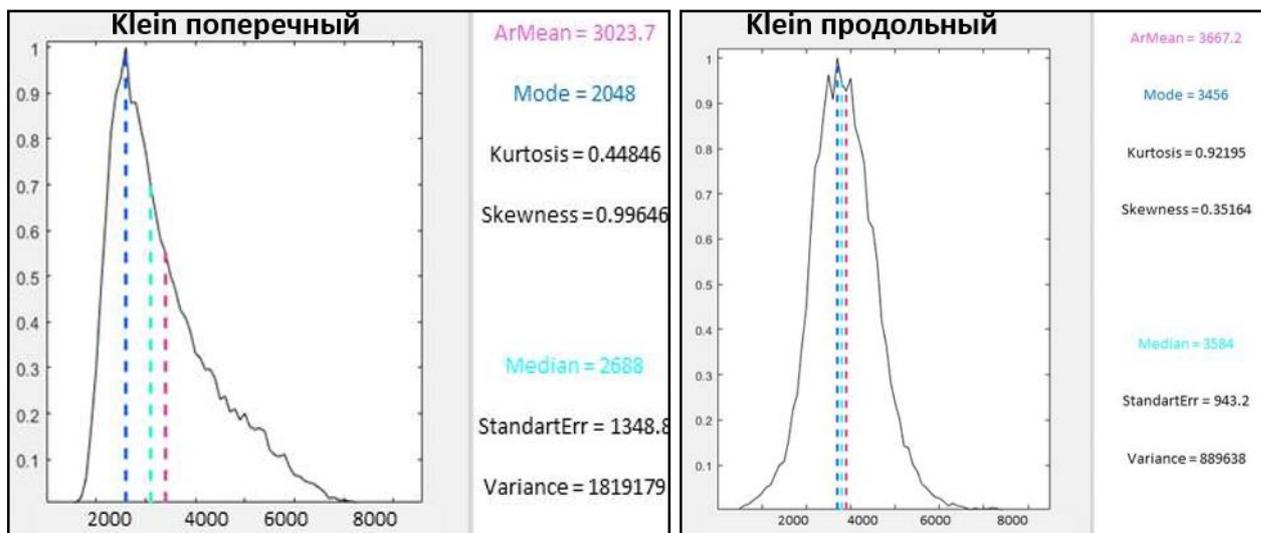


Рисунок 27. Гистограмма распределения интенсивности обратного рассеяния в окне 50x50 м на данных гидролокатора Klein (445 кГц). Участок выхода коренных пород. Профили поперечного (слева) и продольного (справа) направлений.

- Оценка вклада каждого атрибута методом главных компонент и экспертом;

По результатам исследования и экспертного мнения следующие атрибуты являются наиболее значимыми:

- Для среднечастотного ГЛБО поперечного направления - Skewness, StErr, Kurtosis, ArMean и H
- Для среднечастотного ГЛБО продольного направления - Azimuth, StErr, Skewness, ArMean и H
- Для низкочастотного ГЛБО обоих направлений - Skewness, StErrAr, Kurtosis, ArMean и H

Для каждого типа данных методом К-средних был проведён кластерный анализ атрибутов, рассчитанных по данным гидролокации бокового обзора.

## 4.2 Геологическое строение по данным мультимастотных сейсмоакустических наблюдений<sup>3</sup>

Район работ сейсмическими и сейсмоакустическими методами исследован достаточно подробно. Результаты этих исследований отражены во многих публикациях, в том числе и с участием автора (Кубышкина и др., 2012, Сорокин и др. 2009, Токарев, 2016, Старовойтов и др., 2018аб, Старовойтов и др., 2022) описаны сейсмостратиграфические особенности верхней части разреза. Обобщенные сейсмогеологические характеристики и принципы выделения основных сейсмокомплексов подробно приведены в Главе 2.

При интерпретации сейсмических данных для определения геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов автором решены следующие задачи:

- Изучено блоковое строение фундамента и установлены основные разрывные нарушения;
- Изучено распространение и мощность ледниковых отложений;
- Изучено распространение и мощность ледниково-морских и морских отложений.

Юго-западнее мыса Киндо наблюдается характерный для региона трехслойный разрез (Рисунок 28). По смене типов волновой картины выделяется кровля фундамента и моренных отложений (Терёхина и др., 2017). В понижениях фундамента увеличивается мощность постледниковых осадков. На выступах фундамента залегают ледниковые отложения. Наблюдается облекание моренных образований более молодыми отложениями.

---

<sup>3</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

- [1]. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.** Атлас по интерпретации геофизических данных для морской практики на Белом море. Учебное пособие. // 2018а. КДУ «Университетская книга» Москва. ISBN 978-5-91304-810-3. 110 с. 6,88 п.л., авторский вклад 25%.
- [2]. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.**, Козупица Н.А. 2018 Строение осадочного чехла Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустики // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2018б. № 2. С. 81–92. 0,75 п.л., авторский вклад 15%. Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298.
- [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.
- [4] **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.

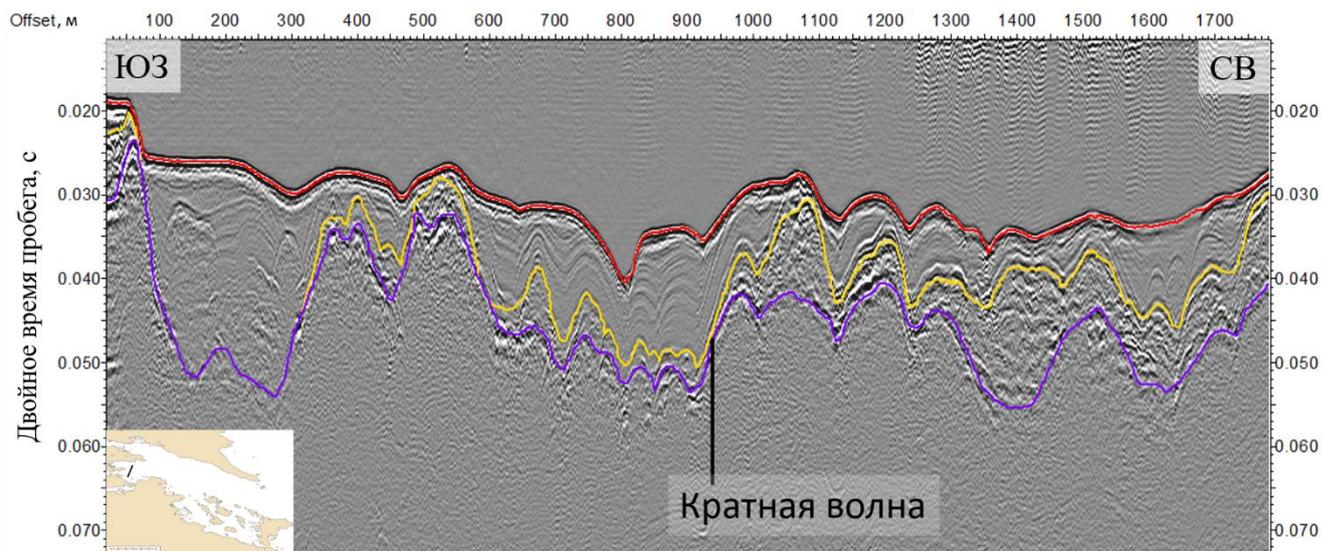


Рисунок 28. Сейсмический разрез по профилю 2004\_r\_223 в юго-западной части полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля.

Севернее мыса Киндо выделяется два сейсмокомплекса, соответствующих кристаллическому фундаменту и мореным отложениям (Рисунок 29).

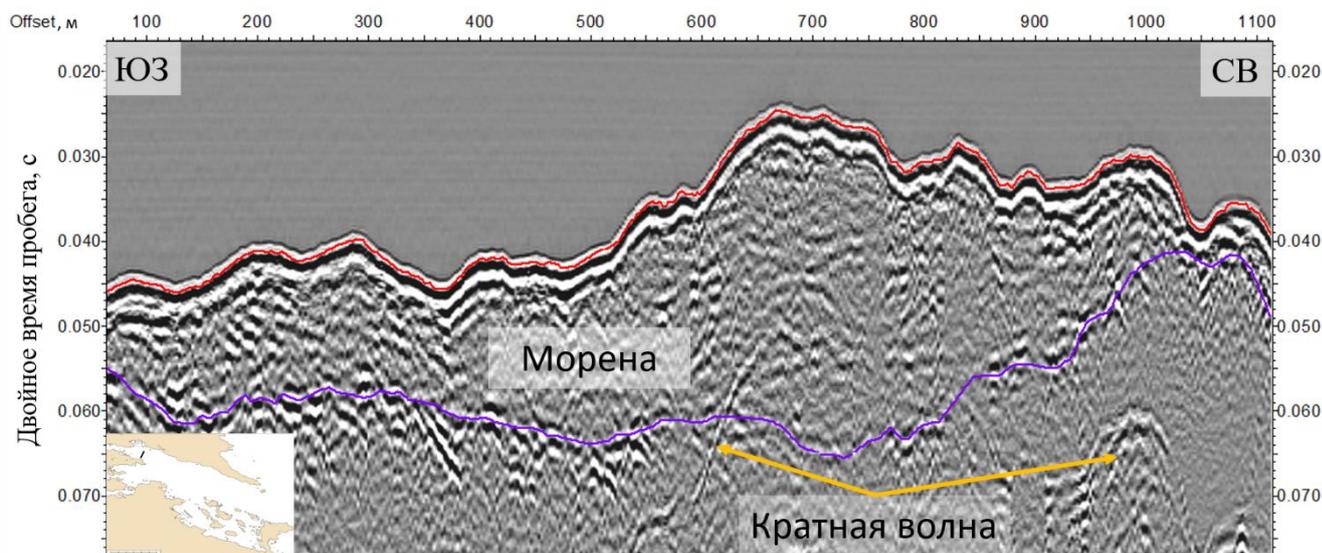


Рисунок 29. Сейсмический разрез по профилю 2004\_r\_329 в северо-западной части полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля.

На юге профиля 2016\_line0126 (Рисунок 30) выделяется поднятый блок фундамента, который перекрыт моренными отложениями, образующими положительные формы рельефа (гряды и холмы). В центральной впадине на кристаллическом фундаменте залегает морена, перекрытая ледниково-морскими и морскими осадками. Внутреннее строение наиболее молодых отложений свидетельствует об изменчивости условий осадконакопления. В северной части

кровля фундамента поднимается, что свидетельствует о наличии крупного разрывного нарушения.

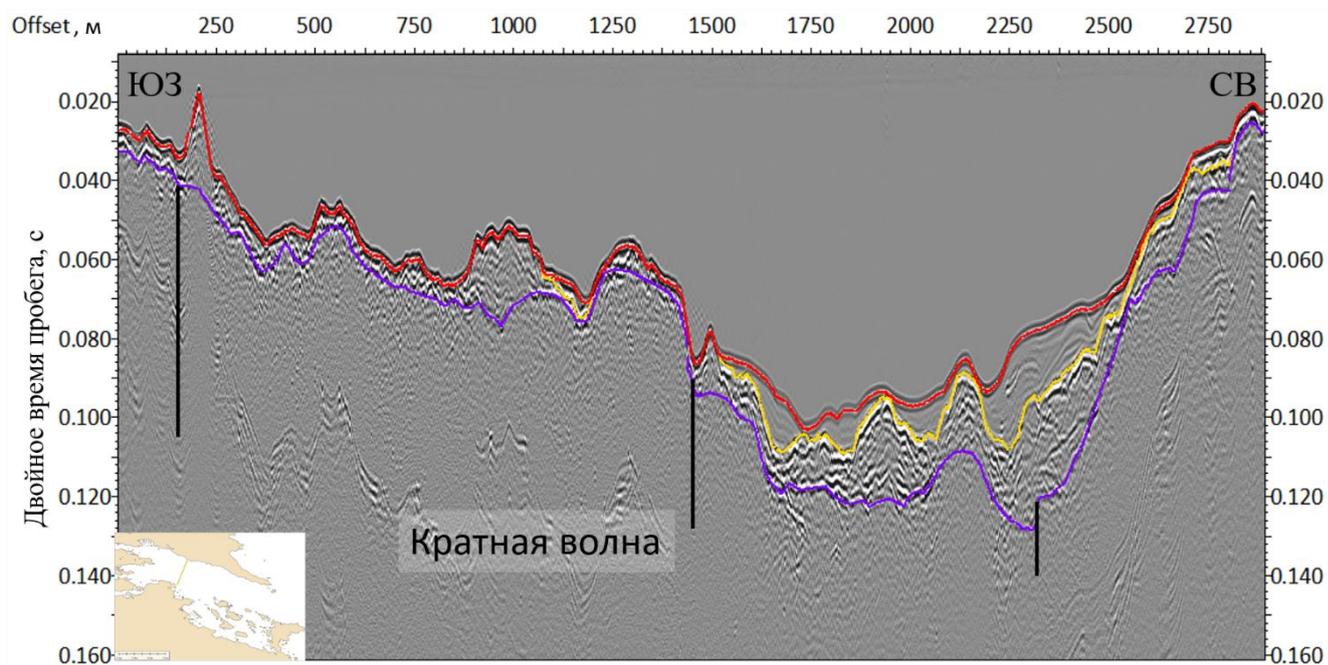


Рисунок 30. Сейсмический разрез по профилю 2016\_line0126 полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля.

На юге профиля 2012\_002 фундамент фрагментарно выходит на поверхность, частично перекрыт тонким прерывистым слоем ледниковых отложений (Рисунок 31). Во впадинах происходит их заполнение постледниковыми осадками. В днище пролива наблюдается понижение кровли фундамента, осложненное моренными грядами, которые в свою очередь облекаются осадками. На крутых склонах развиты гравитационные процессы.

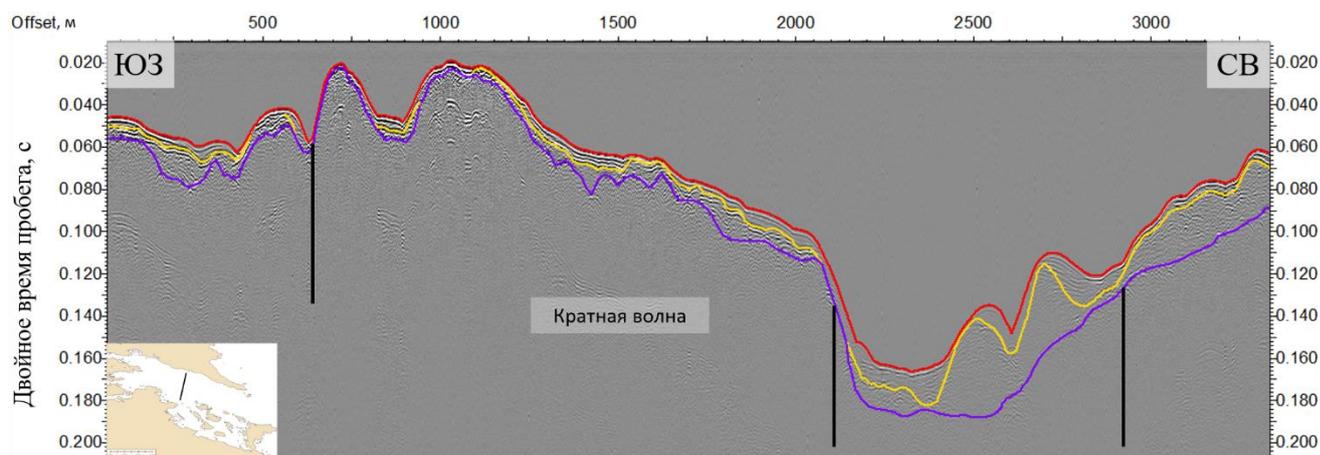


Рисунок 31. Сейсмический разрез по профилю 2012\_002 полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля.

В восточной части площади разрез сильно отличается (Рисунок 32). На северном склоне на фундаменте залегает толща большой мощности с хаотическим типом сейсмической записи. Предположительно, это может быть оползневой толщей с изменяющейся мощностью и сложной внутренней структурой. Тело оползня перекрыто толщей, сложенной тонкослоистыми субгоризонтально залегающими осадками, вероятно, морского генезиса. (Старовойтов и др., 20186).

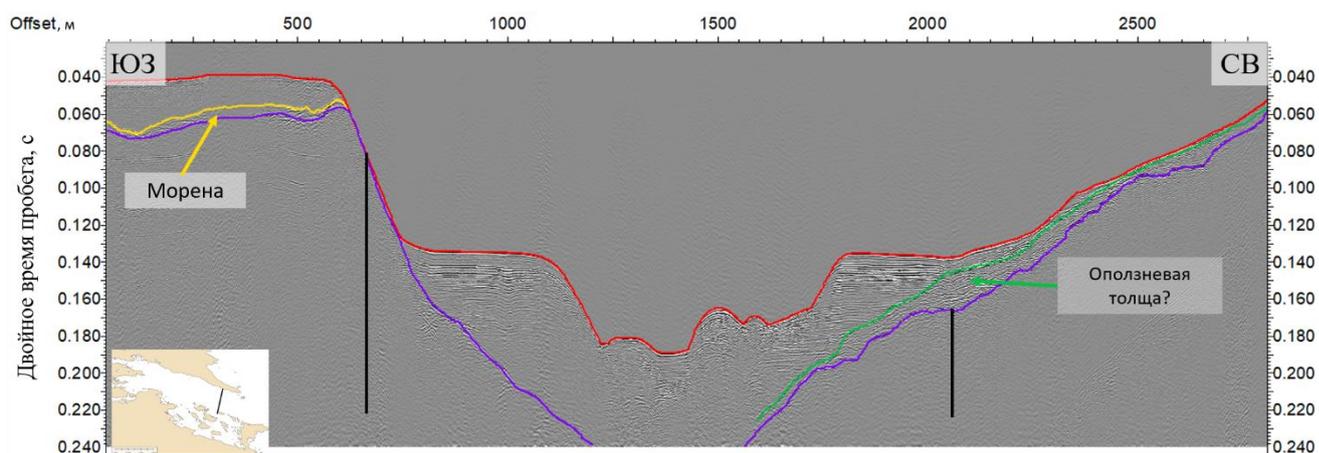


Рисунок 32. Сейсмический разрез по профилю 2008\_V011 полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля.

Таким образом, на большей части изученной площади кровля архейского комплекса залегает на глубине до 50 м, за исключением юго-восточной части пролива Великая Салма, кровля погружается до глубины около 200 м. В плане наиболее погруженная часть кровли коренных пород практически полностью совпадает с современной подводной депрессией, вытянутой по оси пролива. Поверхность фундамента, как правило, сильно сглажена, а местами он 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 (Рисунок 33). Основными являются разломы северо-западного простирания, которые образуют грабен пролива. Наблюдается несколько поднятых блоков, разделенных разломами более низкого порядка ССЗ-ЮЮВ простирания.

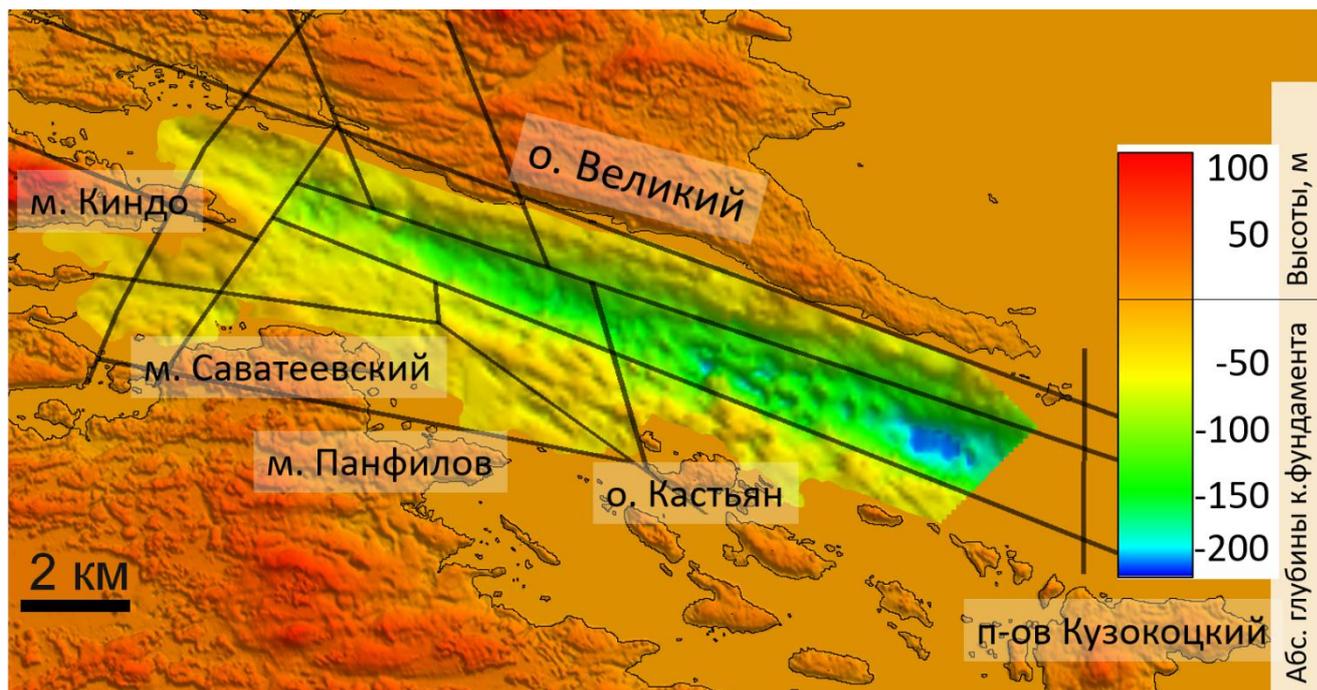


Рисунок 33. Карта кровли кристаллического фундамента с основными разломами. Шкала справа в метрах

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 (Рисунок 34). В среднем мощность ледниковых отложений составляет 10–15 м. В подводной депрессии глубоководной части пролива Великая Салма наблюдаются наименьшие мощности морены или ее отсутствие.

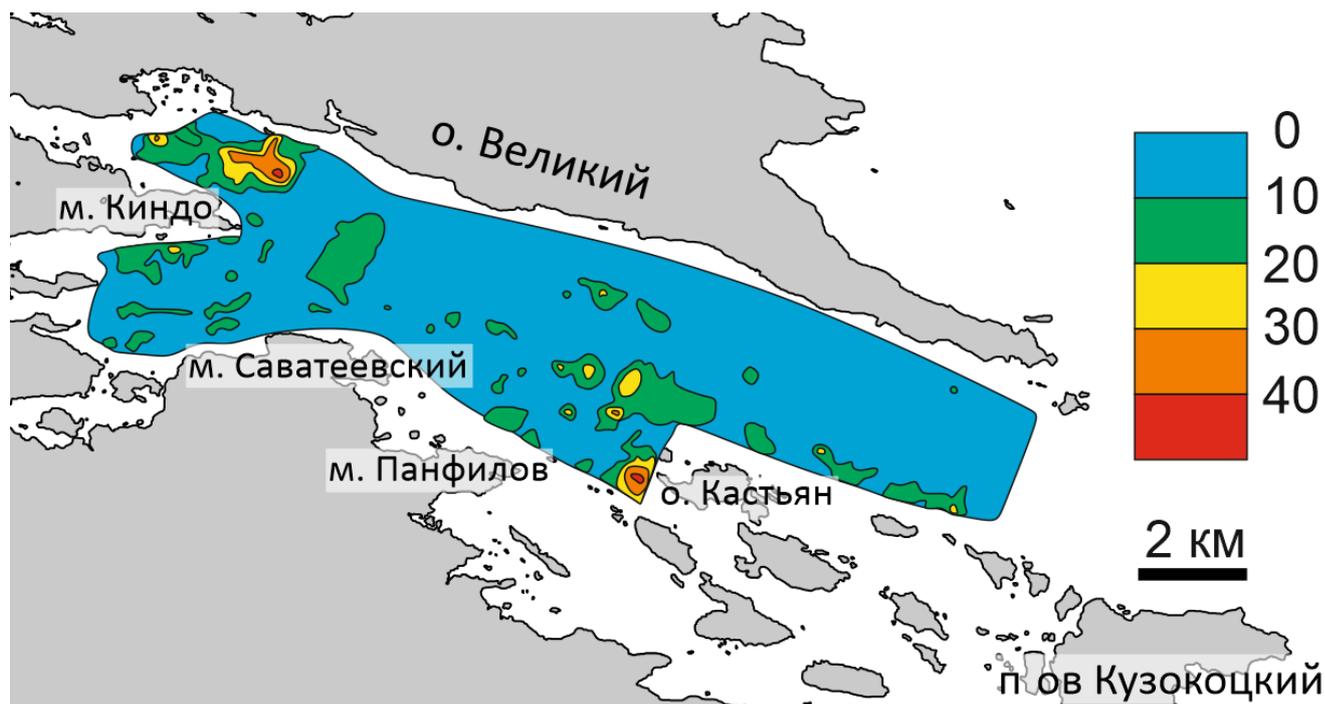


Рисунок 34. Карта мощности моренных отложений

В отличие от ледникового комплекса (Рисунок 34), 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 (Рисунок 35). 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. Их мощность значительно меняется не только по падению склона, но и вдоль дна депрессии.

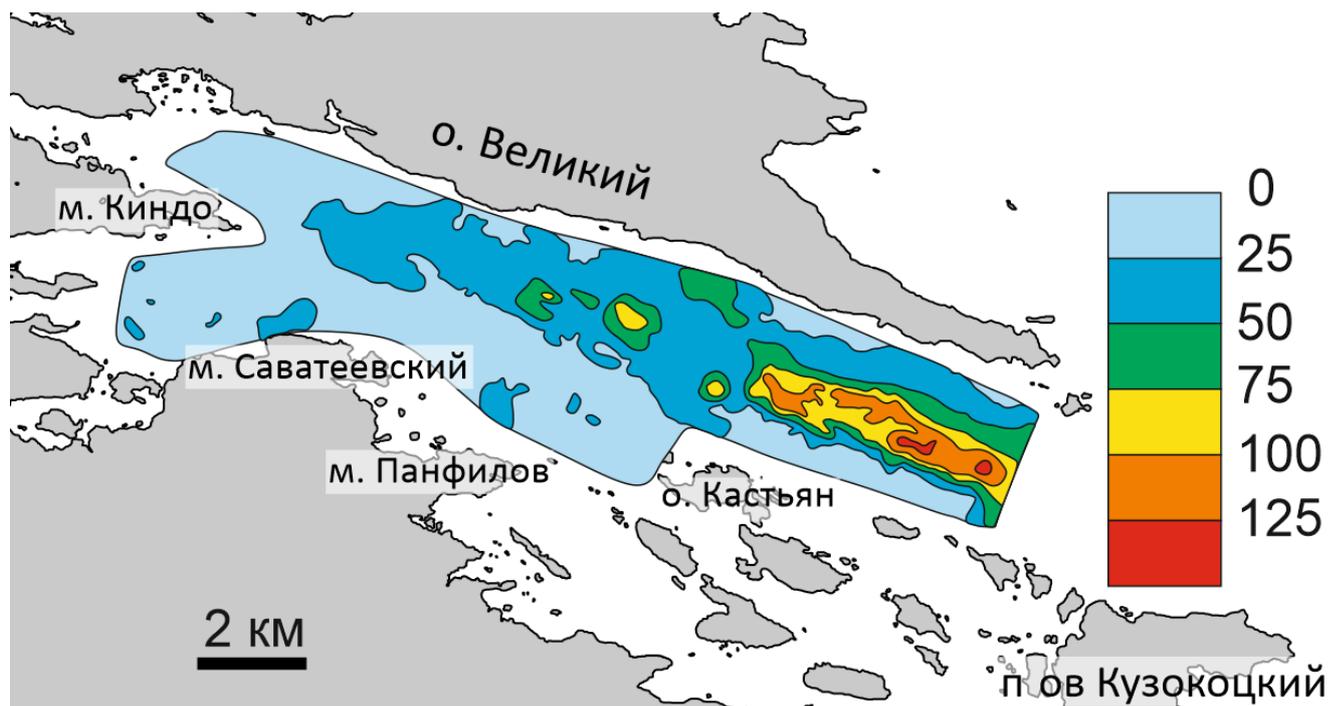


Рисунок 35. Карта мощности постледниковых отложений

#### 4.3 Геоморфологические элементы макро- и мезорельефа по данным МЛЭ<sup>4</sup>.

Детальная цифровая модель рельефа, созданные на ее основе карты изобат (сечение через 5 м и 0.5 м), углов наклона и экспозиции склонов позволили выделить в районе исследований формы макро- и мезорельефа.

Самыми крупными элементами, картируемыми по наблюдаемым данным, являются макросклоны и грабенообразная депрессия пролива Великая Салма (Репкина и др., 2022).

На севере пролива наблюдается узкая субгоризонтальная поверхность с глубинами до 20-25 м, далее поверхность дна резко, ступенями, погружается к днищу пролива, формируя крутой макросклон с подножием на глубинах 90-100 м (по поверхности дна). Значительные (от 5 до 20°)

<sup>4</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

[1]. Репкина Т.Ю., Рыбалко А.Е., **Терёхина Я.Е.**, Михайлюкова П.Г., Серeda 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 Кандалякшского 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.

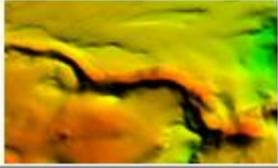
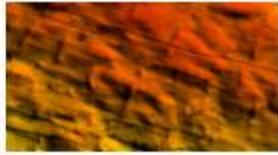
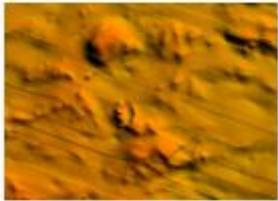
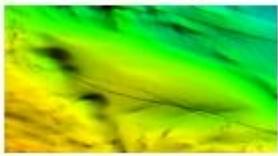
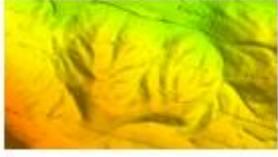
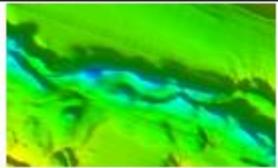
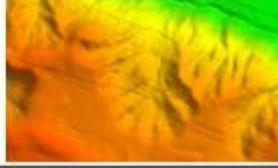
уклоны способствуют развитию на склонах гравитационных процессов и соответствующих форм рельефа.

На южном макросклоне наблюдаются на глубинах 15-35, 40-50 м (по поверхности дна) относительно широкие (0.5-1 км) ступени, разделенные короткими склонами. Поверхности ступеней осложнены холмами, грядами, впадинами и ложбинами. Ниже, на глубинах 50-100 м, склоны становятся более ровными.

На западе полигон исследования делится мысом Киндо на два участка: северный и южный. В центре северного участка наблюдается положительная форма рельефа длиной 1750 м и шириной 750 м с субгоризонтальной вершиной на глубине 15-20 м, склоны крутизной 4-12° с подножием на глубине 40 м имеют сильно расчлененный рельеф. К берегам мыса Киндо и острова Великий от основания описанной ступени поднимаются крутые (до 15°) склоны. Южный участок представляет собой изометричную впадину с глубиной до 30 м, окаймленную склонами с уклонами до 10°, на северо-востоке переходящую в полого-наклонную равнину с глубинами от 0 до 20 м (Репкина и др., 2022).

Кроме того, 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 (Таблица 9).

Таблица 9. Типы элементов мезорельефа и их генезис

	1. Флювиогляциальная гряда (Оз)		7. Моренные гряды, морские отложения отсутствуют
	2. Равнины с маломощными ледниково-морскими и морскими отложениями		8. Скальные выходы в виде гряд
	3. Равнины с мощными ледниково-морскими и морскими отложениями		9. Склон, осложненный ложбинами зерновых потоков
	4. Тела небольших оползней		10. Структурно-обусловленная ложбина
	5. Крутые склоны, осложненные сетью эрозионных ложбин		11. Изометричные впадины на равнинах с ледниково-морскими и морскими отложениями
	6. Крупный эрозионный врез в «мягких» осадках		12. Оползневые цирки, осложненные сетью эрозионных ложбин

#### 4.4 Структура донных отложений по гидроакустическим данным и результатам пробоотбора<sup>5</sup>

Интерпретация данных гидролокации бокового обзора проводилась с целью определения микрорельефа поверхности и особенностей осадков, слагающих морское дно. При качественной (экспертной) интерпретации на обработанных и составленных в мозаики сонограммах выделялись однородные области со схожим гидроакустическим изображением. С помощью акустического профилографа давалось геологическое толкование ярких и тусклых пятен на мозаичном изображении.

В качестве исходного материала имелись данные трёхчастотной гидролокации бокового обзора, полученные аппаратурой Klein 3900 на частотах 445 и 900 кГц и С3D на частоте 200 кГц в продольном и поперечном направлении к оси пролива Великая Салма. Геолого-геоморфологическая интерпретация выделенных типов основывалась на цифровой модели рельефа дна и данных профилографа, а также сейсмоакустических данных.

Поскольку величина обратного рассеяния зависит не только от литологии донных отложений, но и от рельефа дна, необходимо рассматривать данные по обоим бортам гидролокатора, а также в продольном и поперечном направлении. Изменение положения высокоамплитудных областей и акустической тени на разных профилях на одном участке позволяет утверждать, что они связаны с особенностями рельефа дна. Интерпретация мозаик показала, что области с наибольшей величиной обратного рассеяния соответствуют наклонным поверхностям в рельефе дна: склонам ложбин или гряд. Интенсивность остальных областей в большей степени связана с литологией донного осадка, нежели с рельефом дна. Поскольку основные линейные структуры на изучаемом полигоне имеют простирание вдоль оси пролива,

---

<sup>5</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

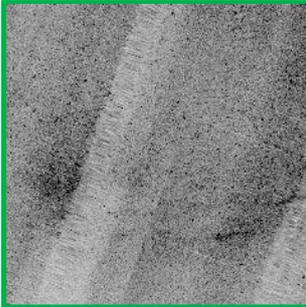
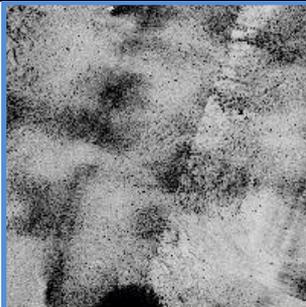
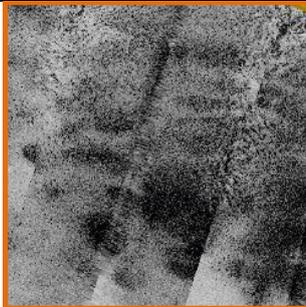
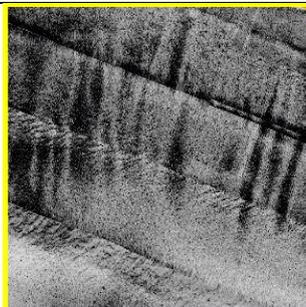
[1]. Репкина Т.Ю., Рыбалко А.Е., **Терёхина Я.Е.**, Михайлюкова П.Г., Середа И.И., Соловьева М.А., Потемка А.К., Токарев А.М., Токарев М.Ю., Исаченко А.И., Шабалин Н.В. Опыт крупномасштабного геоморфологического картографирования гляциальных шельфов по геофизическим данным (пролив Великая Салма Кандалакшского 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.

[2]. **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.

для интерпретации предпочтительнее использовать мозаики поперечного направления, на которых в меньшей степени отражаются рельеф продольных структур.

В результате дешифрирования мозаик выделено 7 типов акустического изображения дна (Таблица 10), различающихся средней интенсивностью обратного рассеяния и взаимным расположением, и характером неоднородностей в пределах областей каждого типа.

Таблица 10. Краткое описание выделенных типов однородностей на данных гидролокации бокового обзора с примером акустического изображения.

№	Пример акустического изображения	Амплитудная характеристика однородных областей, выделенных на данных ГЛБО	№	Пример акустического изображения	Амплитудная характеристика однородных областей, выделенных на данных ГЛБО
1		Однородная низкоамплитудная запись с редкими участками средней и высокой амплитуды, характеризующимися малыми размерами и неясными очертаниями	5		Однородная среднеамплитудная запись, характеризующаяся малым количеством участков с повышенной амплитудой, не имеющих чётких границ
2		Менее однородная низкоамплитудная запись, характеризующаяся значительным количеством более интенсивных областей небольших размеров и неясных очертаний	6		Среднеамплитудная запись с изометричными участками повышенной амплитуды небольших размеров
3		Сильно неоднородная запись с резким изменением амплитуды. Области равной интенсивности бесформенные и чаще всего не имеют чётких границ	7		Субмеридиональные высокоамплитудные узкие зоны на фоне среднеамплитудной записи

№	Пример акустического изображения	Амплитудная характеристика однородных областей, выделенных на данных ГЛБО	№	Пример акустического изображения	Амплитудная характеристика однородных областей, выделенных на данных ГЛБО
4		Высокоамплитудные практически однородные зоны			

Далее подробно описаны характеристики каждого типа.

**Тип 1.** Участки однородной низкой интенсивности обратного рассеяния, практически без неоднородностей. Располагаются в осевой части пролива Великая Салма вдоль глубокой центральной ложбины, а также в юго-западной части полигона. На мозаиках отображаются светло-серым цветом с более тёмной «зернистостью» при приближении к оси пролива. Совмещение с батиметрическими данными показывает, что участки данного типа соответствуют обширным равнинным областям. Согласно сейсмоакустическим данным (Рисунок 36), на поверхность выходит мощная толща морских отложений (от нескольких метров до нескольких десятков метров).

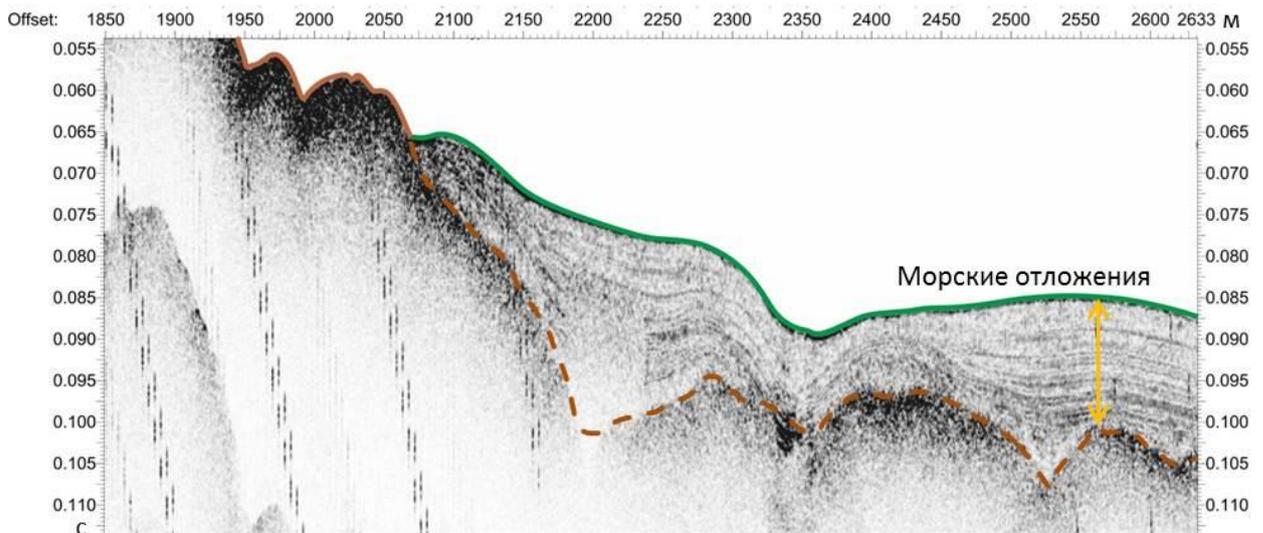


Рисунок 36. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участок типа 1, граничащего с типом 3. Наблюдается мощный комплекс морских отложений.

**Тип 2.** Визуально практически совпадает с типом 1. Представлен обширными областями низкой интенсивности обратного рассеяния с локальными среднеамплитудными

неоднородностями неправильных очертаний. Количество таких неоднородностей значительно больше, чем в типе 1, а их поперечные размеры в среднем составляют 50-100 м. Участки описанного типа соответствуют равнинным областям в южной части исследуемого полигона. Сейсмоакустические профили через данные области демонстрируют наличие маломощного чехла морских отложений поверх морены, которая местами практически выходит на поверхность дна (Рисунок 37), с чем, вероятно, и связано наблюдение участков более интенсивного обратного рассеяния на однородном низкоамплитудном фоне.

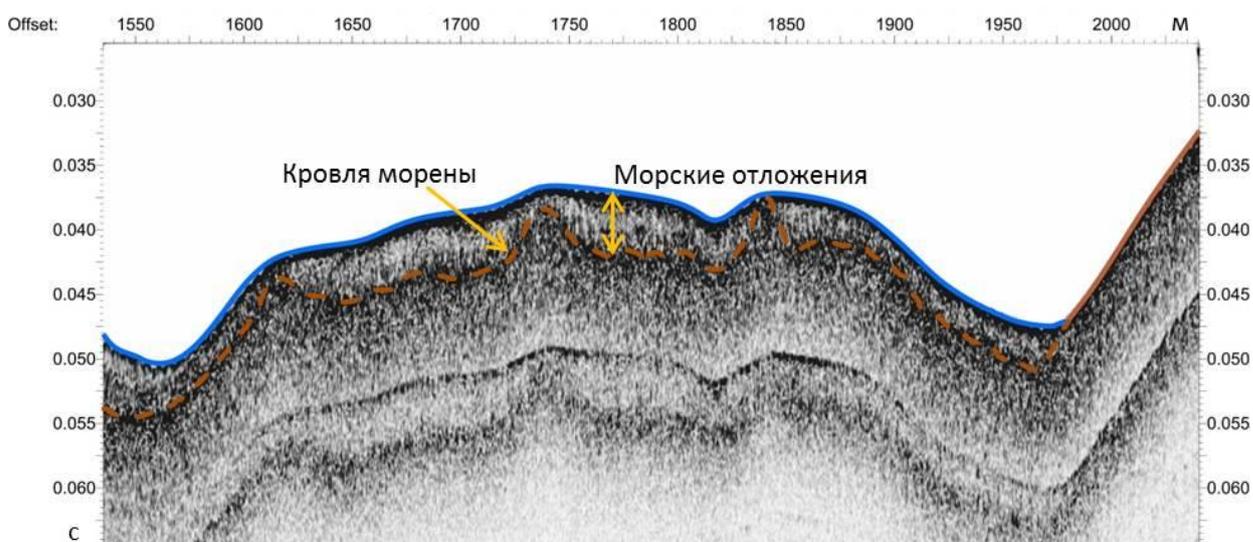
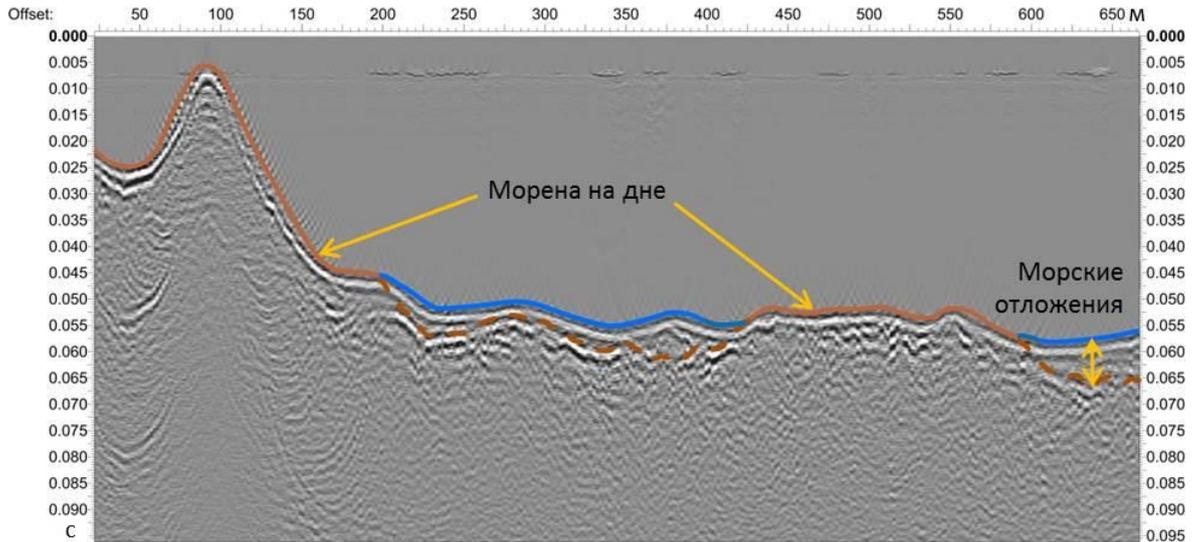


Рисунок 37. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участок типа 2, граничащего с типом 3. Маломощные морские отложения залегают на ледниковом субстрате, кровля морены на некоторых участках выходит на поверхность дна.

**Тип 3.** Характеризуется контрастной и сильно неоднородной записью с резкой изменчивостью амплитуд на малых расстояниях от низких до высоких. Области равной интенсивности обратного рассеяния имеют неровные, часто сильно изрезанные очертания. Участки указанного типа, вытянутые в плане в различных направлениях, иногда неровной формы. Располагаются в южной и юго-западной части полигона, а также обширной областью в северо-западной части напротив мыса Киндо. Сопоставление областей типа 3 с цифровой моделью рельефа и сейсмоакустическими данными позволяет интерпретировать данные зоны как слабохолмистый рельеф, образованный моренными грядами с практически полным отсутствием морских осадков на поверхности дна (Рисунок 38). Рельеф дна на данных участках неровный, холмисто-грядовый. На поверхность дна выходят ледниковые отложения, в редких случаях перекрытые маломощными морскими осадками (области со средней интенсивностью обратного рассеяния).



*Рисунок 38. Пример сейсмоакустического разреза через участки типа 3 (архивные данные). Наблюдаются выходы ледниковых отложений на поверхность дна в виде гряд или равнинных областей, местами перекрытых маломощными морскими отложениями (участки типа 2).*

**Тип 4.** Участки высокой интенсивности обратного рассеяния, практически однородные. Граничат с низкоамплитудными областями, благодаря чему чётко определяются их контуры. Области данного типа представляют собой параллельные узкие вытянутые зоны вдоль оси пролива, к югу от неё, в юго-восточной части полигона. Соотношение длины к ширине в среднем равняется 10. Данные области соответствуют вытянутым холмам, которые являются горстообразными поднятиями фундамента. Согласно сейсмоакустическим исследованиям, на данных участках на поверхность дна выходит кристаллический фундамент, перекрытый местами маломощными ледниковыми отложениями (Рисунок 39).

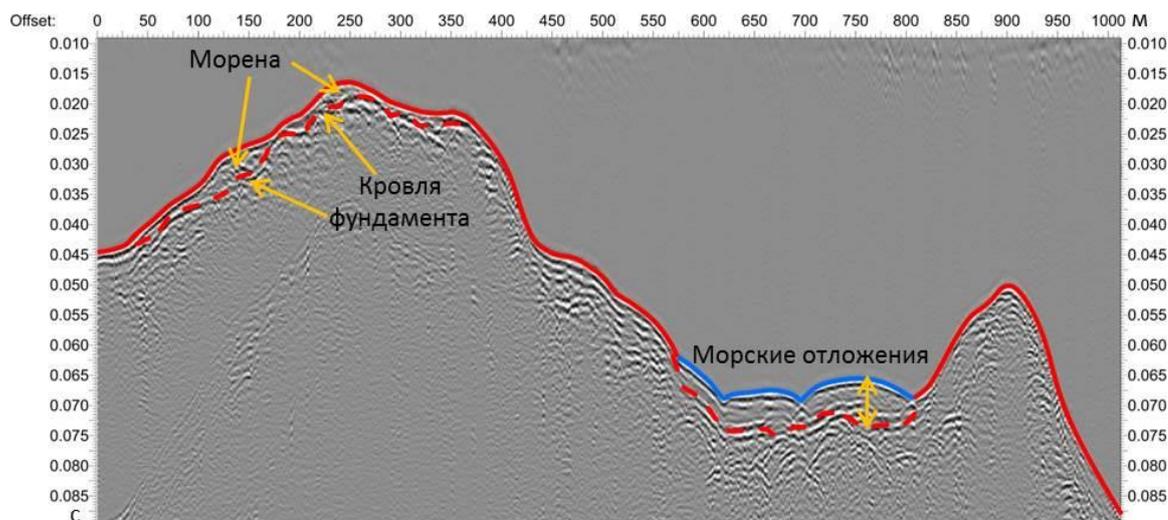


Рисунок 39. Пример сейсмоакустического разреза через участок типа 4 (архивные данные). Выделяются горстообразные поднятия фундамента, на котором местами залегают мало мощная морена.

**Тип 5.** Однородные области средней интенсивности обратного рассеяния, характеризующиеся малым количеством небольших участков повышенной амплитуды, не имеющих чётких границ. Границы с соседними областями неясные, часто трудно дешифрируемые. Описываемые области располагаются широкой полосой вдоль северного борта пролива Великая Салма. Согласно данным многолучевого эхолотирования, эти области расположены на подводном склоне пролива вдоль его простираения. По данным съёмки акустического профилирования, на поверхности залегают морские осадки (Рисунок 40).

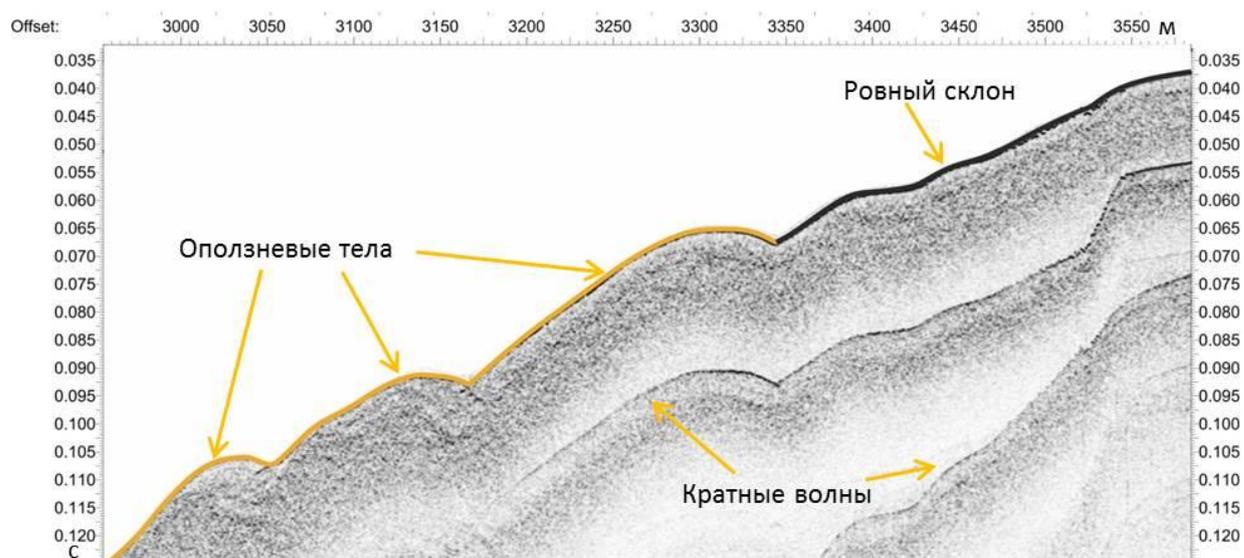
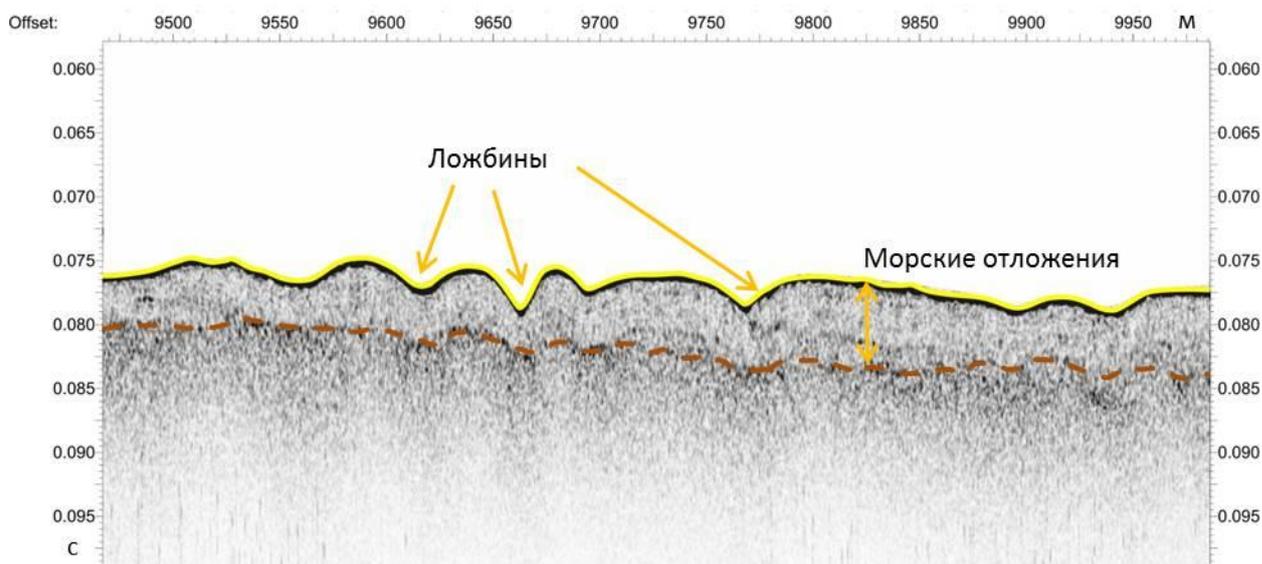


Рисунок 40. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участки типов 5 и 6. Наблюдаются оползневые тела в нижней части северного склона.

**Тип 6.** Среднеамплитудная область, на фоне которых выделяются многочисленные округлые зоны с повышенной интенсивностью обратного рассеяния, размером около 50-70 м в диаметре. Данный участок расположен в нижней части северного склона и вытянут параллельно области типа 5. Высокоамплитудные зоны соответствуют неровностям рельефа, связанных с образованием многочисленных небольших оползней (Рисунок 40). На поверхности дна залегают морские отложения.

**Тип 7.** Неоднородная, преимущественно среднеамплитудная область, на фоне которой наблюдаются многочисленные узкие удлинённые субмеридианальные зоны с высокой интенсивностью обратного рассеяния. Длина высокоамплитудных участков достигает 400 м при ширине около 20-40 м. Они расположены довольно равномерно в пределах области выделенного типа, наиболее отчётливо наблюдаясь в северо-западной части. Область, соответствующая типу 7, располагается широкой полосой вдоль северного края полигона. Согласно сопоставлению с цифровой моделью рельефа выделенная область совпадает с северным склоном пролива Великая Салма, на котором выделяются многочисленные узкие ложбины по падению склона, совпадающие по положению с высокоамплитудными участками на данных гидролокации бокового обзора (Рисунок 41). На всём склоне в пределах выделенной области на поверхности дна сплошным покровом расположены морские осадки.



*Рисунок 41. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участок типа 7. Наблюдаются ложбины в маломощных морских отложениях.*

По результатам качественной интерпретации построена карта распространения выделенных типов донной поверхности (Рисунок 42).

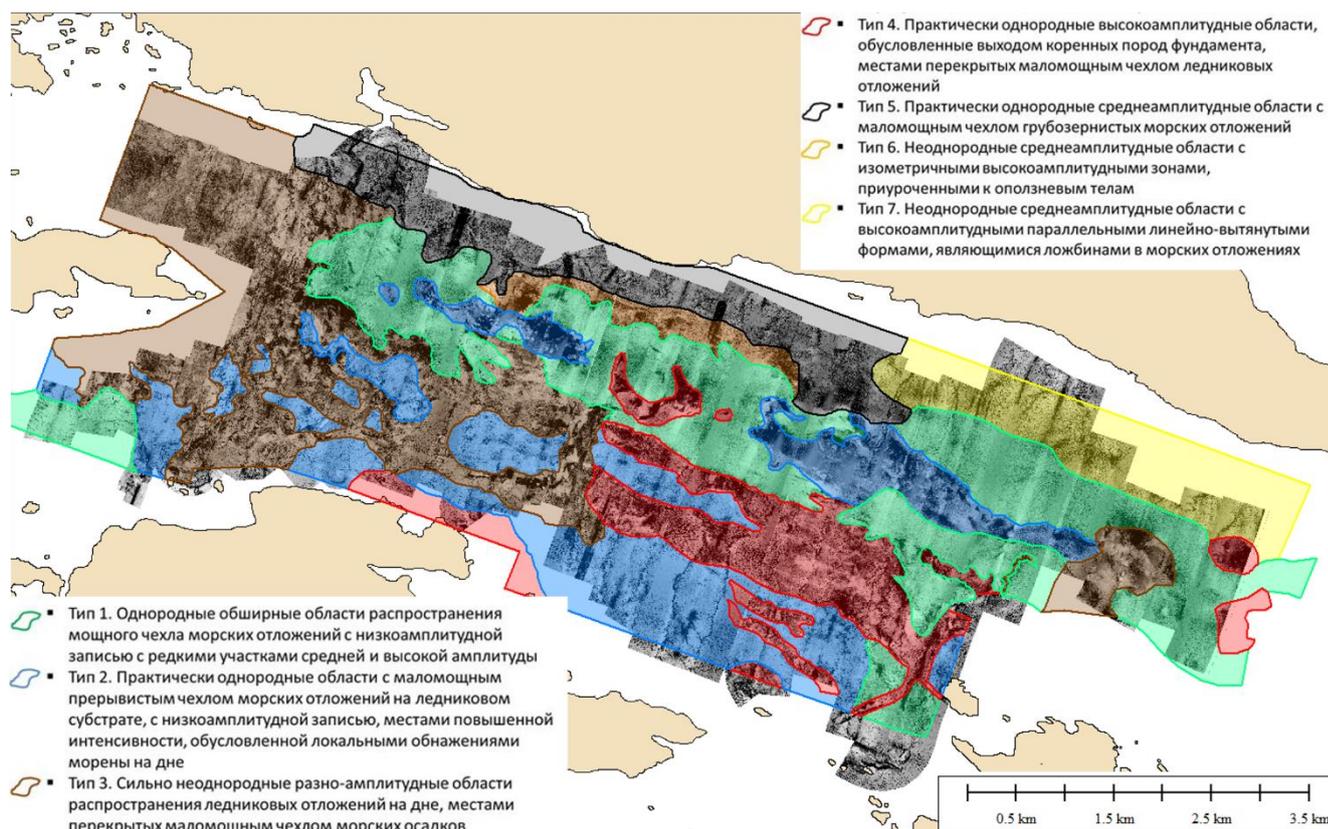


Рисунок 42. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным

Для выделенных областей и возможности их генерализации был выполнен количественный анализ данных гидролокации бокового обзора и многолучевого эхолотирования. Использовался результат кластеризации среднечастотного ГЛБО с разбиением на 30 кластеров (Рисунок 43).

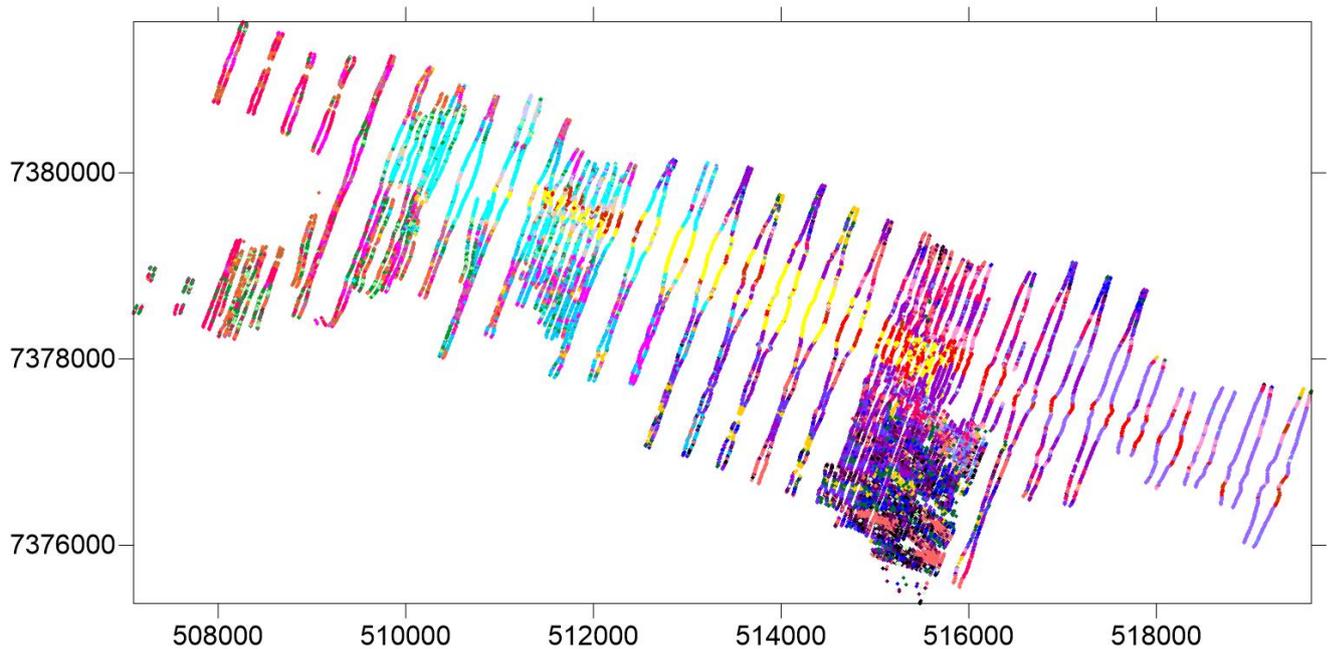


Рисунок 43. Результат разбиение на 30 кластеров по данным среднечастотного ГЛБО поперечного направления. Каждый кластер показан своим цветом.

Производился анализ каждого кластера и их территориальной связности. Сделаны следующие выводы:

- Анализ кластеров западной части пролива показал, что области севернее и южнее Киндомыса схожи (кластер 23), но для южной части характерно также наличие кластера 10, который отсутствует на севере (Рисунок 44);

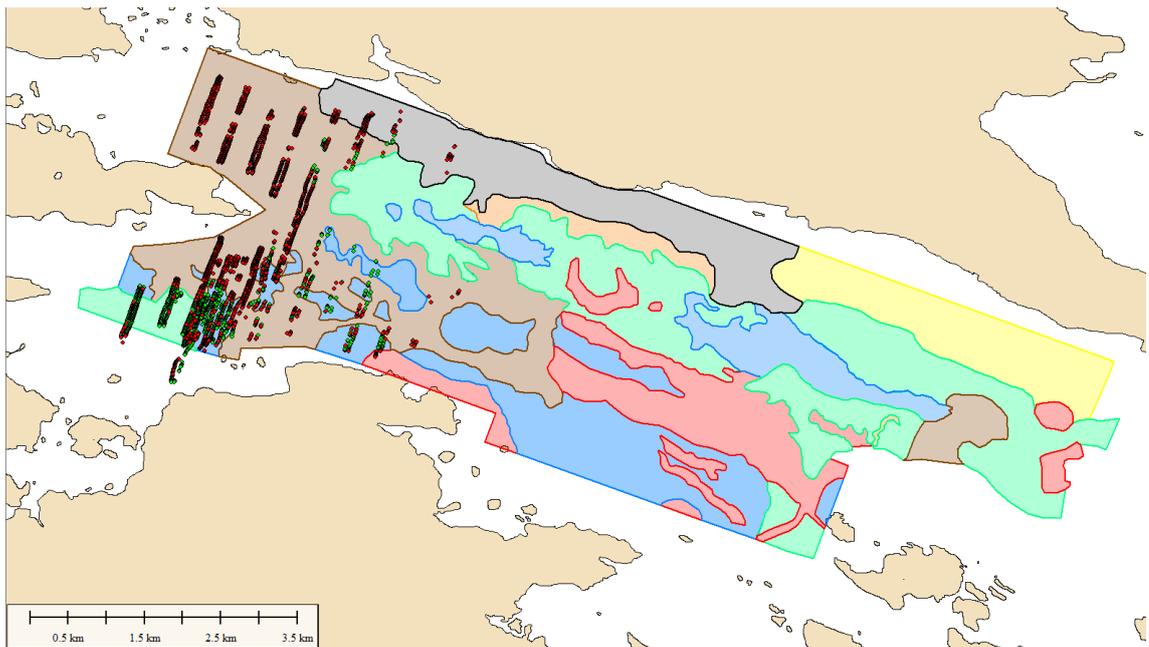


Рисунок 44. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 23 (красные точки) и кластер 10 (зеленые точки)

- Область между мысами Киндо и Саватеевский представлено 3 кластерами (кластеры 4,6 и 29) (Рисунок 45), при этом можно заметить, что отдельные элементы рельефа этого района имеют общие черты с западными областями, где моренные отложения полностью выходят на поверхность (кластер 23);

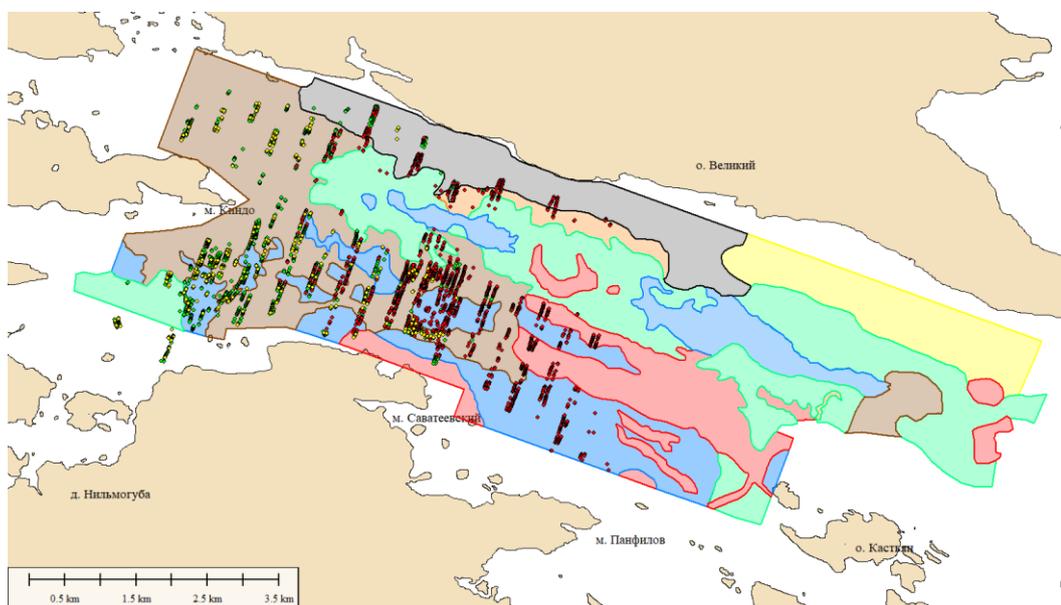


Рисунок 45. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 4 (зеленые точки), кластер 6 (красные точки) и кластер 29 (желтые точки)

- Западное замыкание пролива на глубинах 50-90 м представлено 3 кластерами (Рисунок 46);

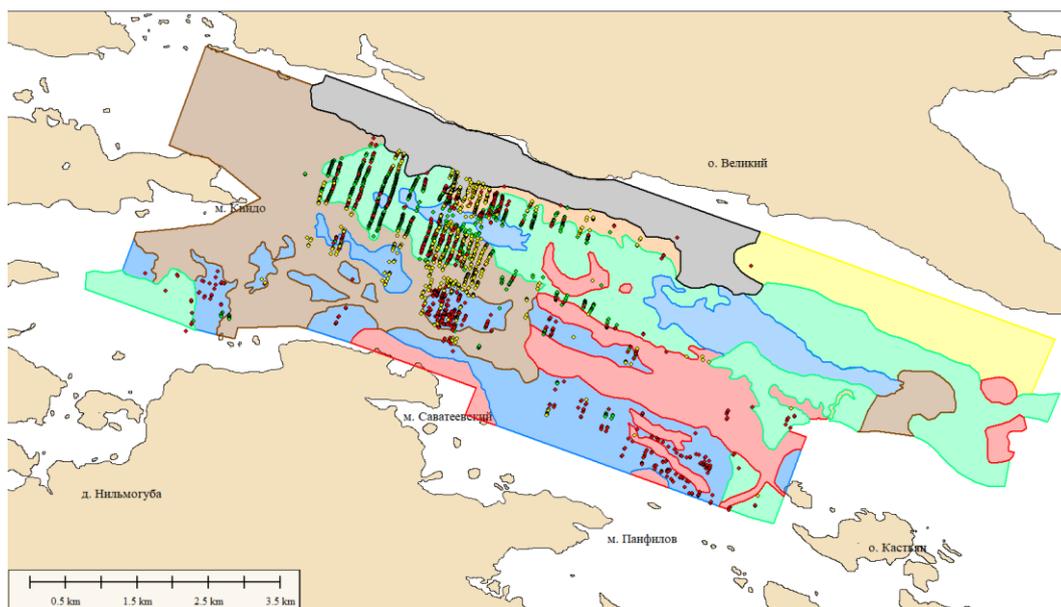


Рисунок 46. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 1 (зеленые точки), кластер 3 (красные точки) и кластер 12 (желтые точки)

- Днище пролива уверенно разделяется в кластерном анализе на западную (кластеры 18 и 20) и восточную области (кластеры 19 и 27) (Рисунок 47);

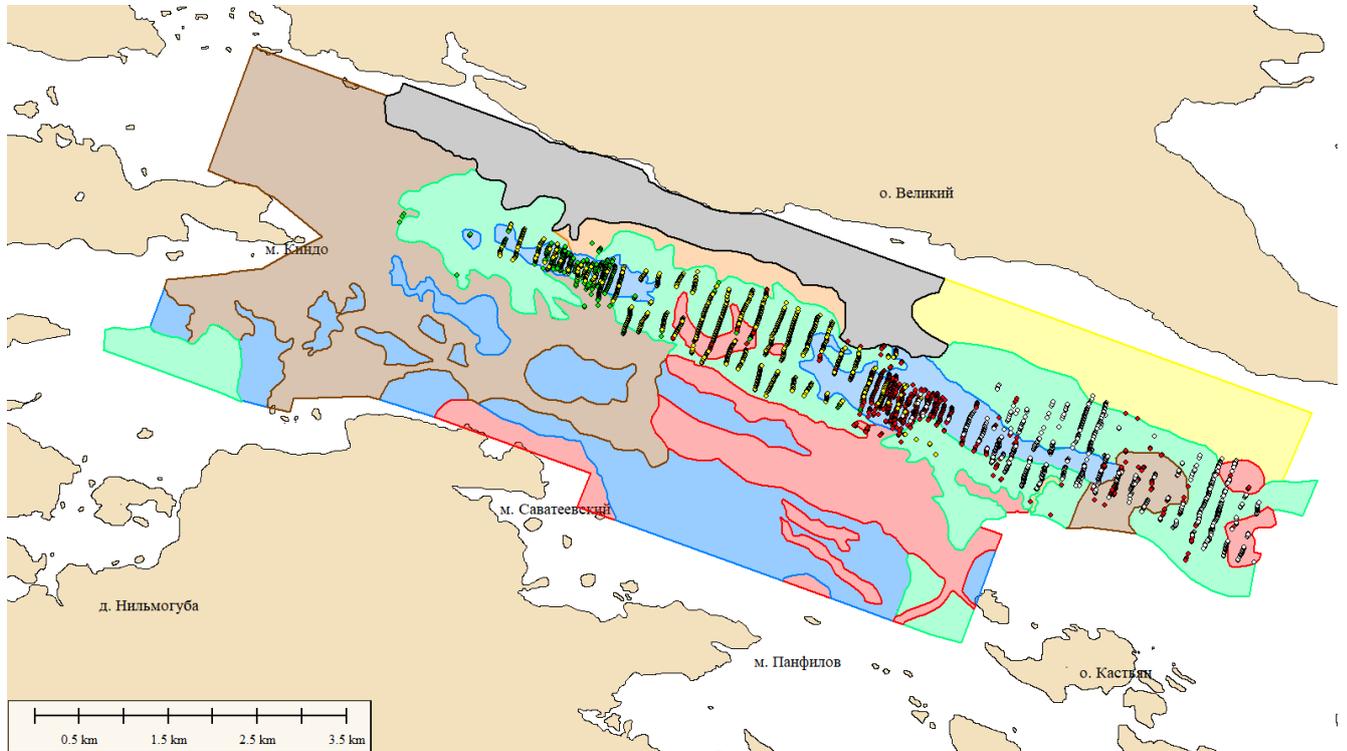


Рисунок 47. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 18 (зеленые точки), кластер 19 (красные точки), кластер 20 (желтые точки) и кластер 27 (белые точки)

- Поверхность поднятого блока фундамента близ острова Кастьян представлено 6 разностями (Рисунок 48);

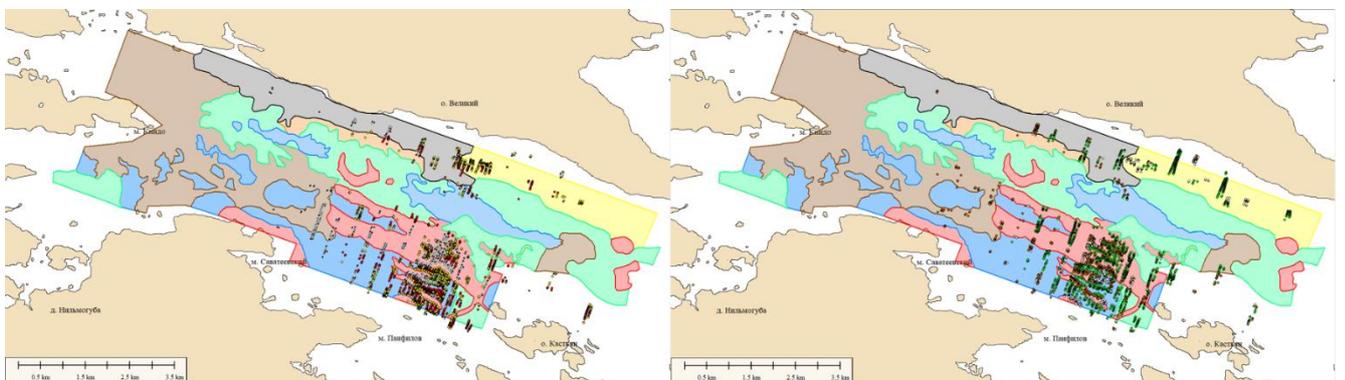


Рисунок 48. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Слева: кластер 14 (красные точки), кластер 16 (желтые точки) и кластер 28 (черные точки). Справа: кластер 8 (зеленые точки), кластер 24 (белые точки) и кластер 25 (коричневые точки)

- Северный и южный склоны восточной части пролива объединились в один кластер, так как ни азимут, ни угол наклона не вошли в кластерный анализ. Для этой зоны наблюдается слабая корреляция с результатами «качественной» интерпретации (Рисунок 49).

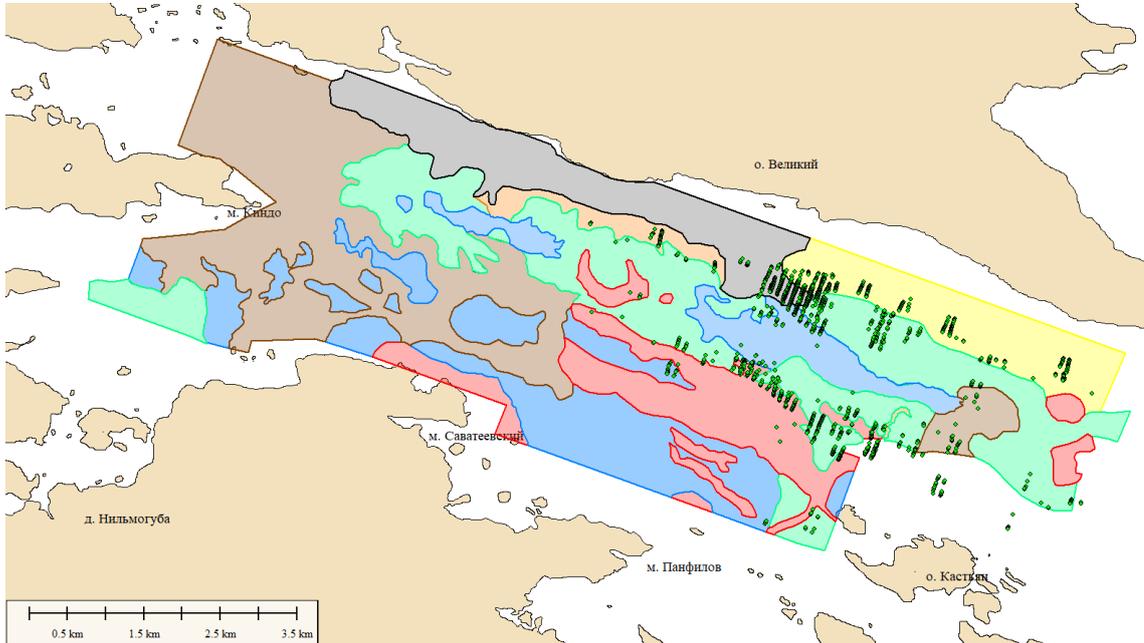


Рисунок 49. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 2 (зеленые точки).

- Глубоководная равнина на востоке выделяется уверенно по кластерному анализу (Рисунок 50).

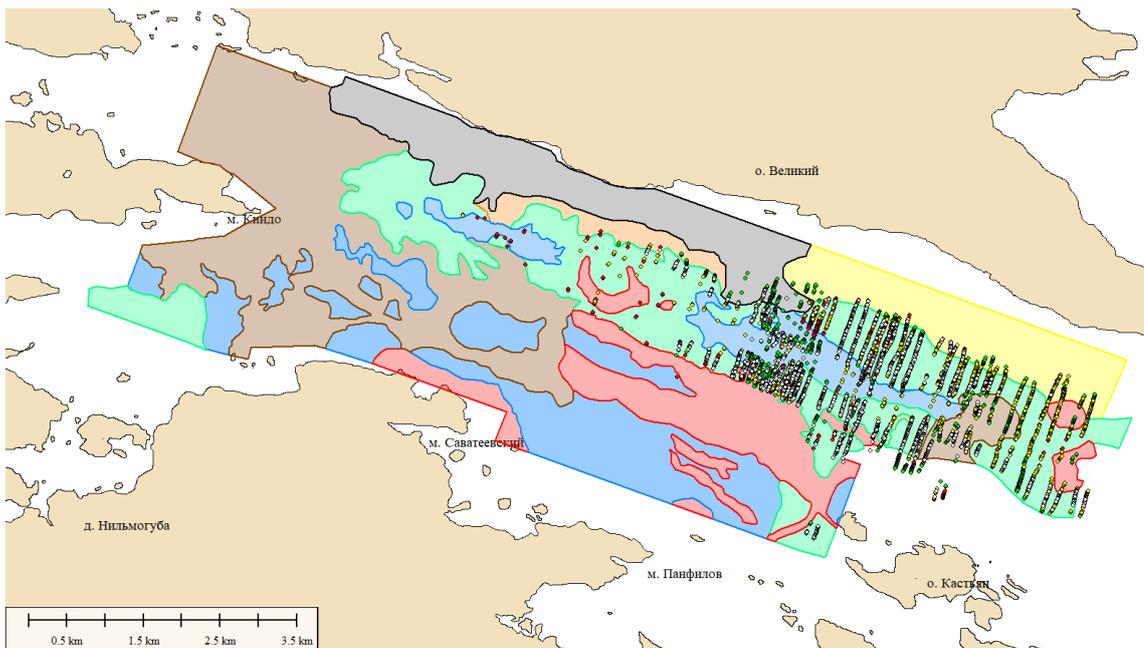


Рисунок 50. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 5 (зеленые точки), кластер 11 (красные точки), кластер 17 (желтые точки) и кластер 22 (белые точки)

Акустическое изображение дна на данных трёх гидролокаторов бокового обзора: С3D (частота 200 кГц) и Klein (частоты 445 и 900 кГц) значительно различается в зависимости от используемой частоты. Низкочастотные данные, полученные гидролокатором С3D, позволяют выделить наиболее общие классы и четко провести их контуры. Более высокочастотные данные (445 кГц) позволяют различить отдельные крупные объекты и выделить подклассы, однако общие элементы прослеживаются хуже. Самые высокочастотные данные (900 кГц) позволяют обнаружить отдельные небольшие объекты и локальные неоднородности дна, но границы классов и подклассов не прослеживаются.

На рисунках ниже представлены возможности высокочастотной гидролокации при обнаружении не крупных объектов и детального изучения донных осадков (Рисунок 51, Рисунок 52). Под каждым примером следует описание наблюдаемого акустического изображения дна.

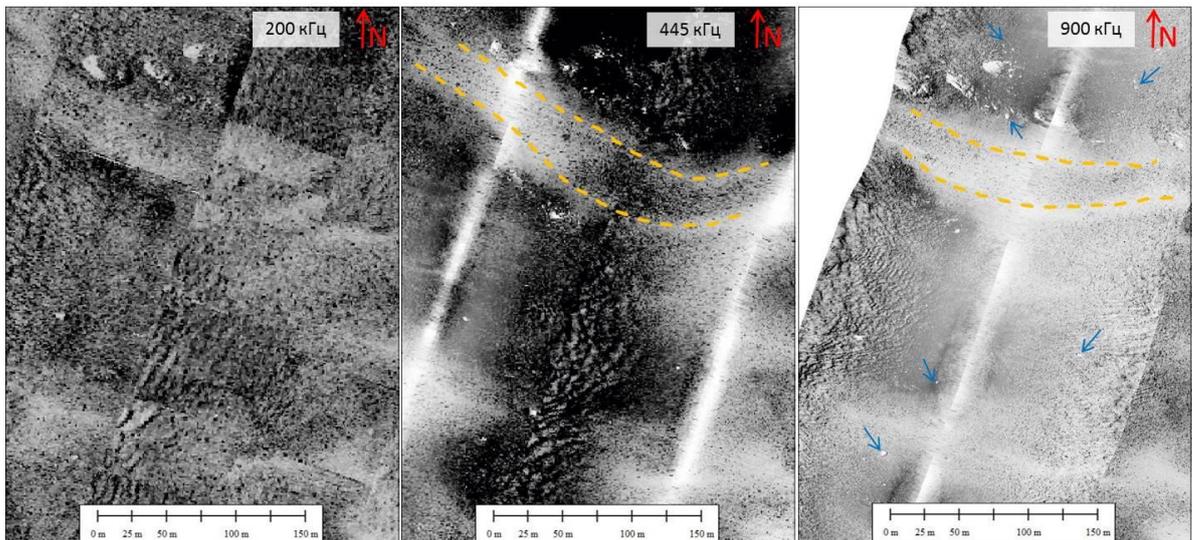


Рисунок 51. Сравнение разночастотных данных на одном участке. Жёлтым пунктиром показаны прослеживаемые области тонкозернистых осадков. Синими стрелками указаны некоторые отдельные объекты, размером 1-2 м (Старовойтов и др., 2018а).

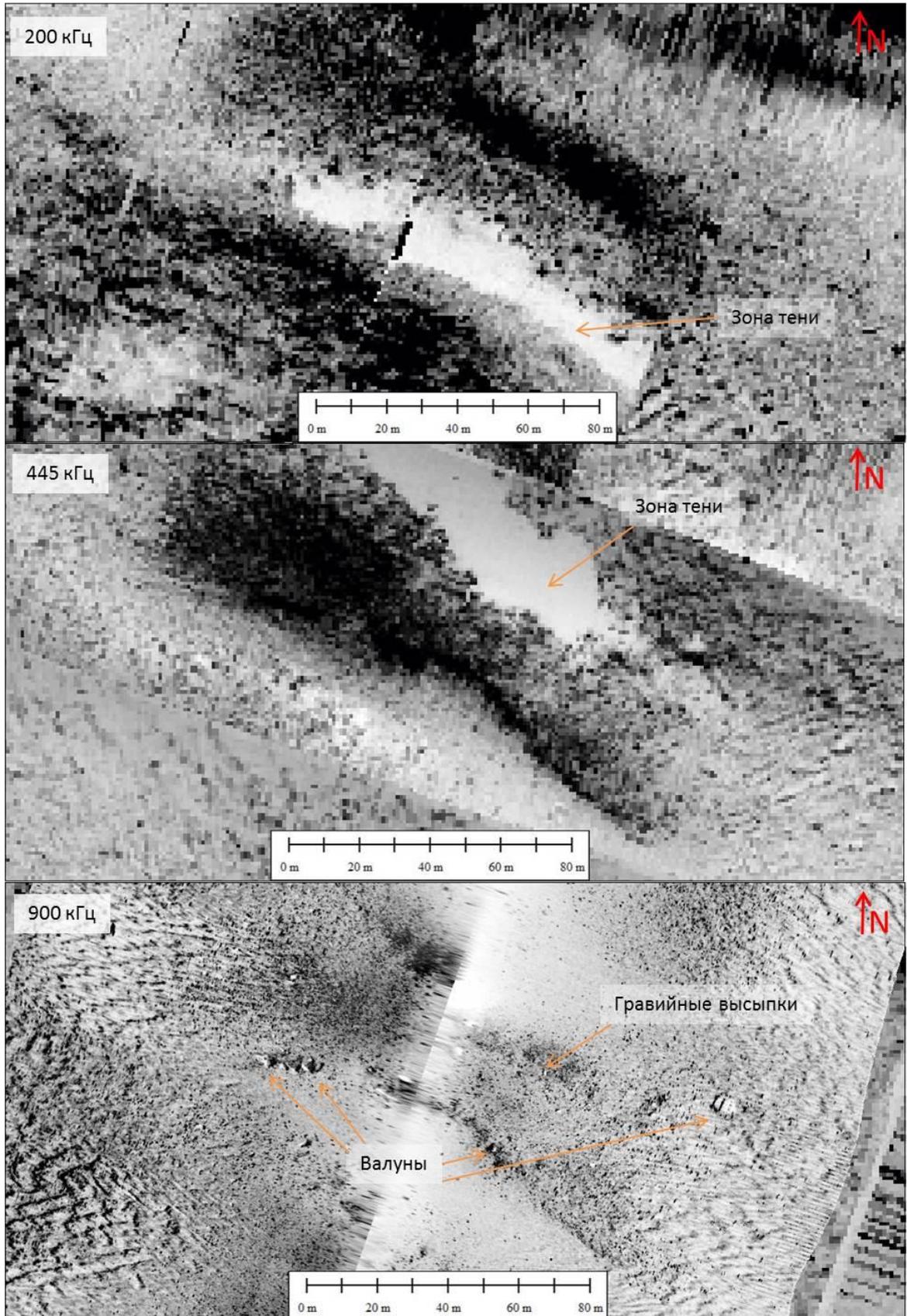


Рисунок 52. Сравнение разночастотных данных на одном участке. Увеличение частоты позволяет уточнить размерность донных осадков, но снижает прослеживаемость однородных зон (Старовойтов и др., 2018а).



Миктитовые разности (смешанные осадки, содержание в которых песчаных, алевроитовых и пелитовых частиц не превышает 33%), пользуются в Салме широким распространением, так как процессы механической дифференциации здесь существенно ограничены.

Миктиты грубообломочные (Мг) выделены с южной стороны полуострова Киндо и вытягиваются к западу от него, а также покрывают осевые части гряд северо-западного простирания. Эти образования формируются в условиях современного размыва.

Гравий с песком (Пгр) по своему генезису является флювиальным, имеет пятнистое распределение за счет чередования чисто гравийных отложений с песками, формирующимися под воздействием течений. Наиболее крупные поля таких осадков располагаются в устье между мысом Киндо и островом Великий и на подводном склоне в северо-западном углу участка. Донный рельеф здесь представляет денудационную поверхность морены. На поднятиях преобладают поля, сложенные гравием, дресвой и разнозернистым песком от гравелистого до среднезернистого. Эти же пески подстилают и относительно маломощный слой гравийно-дресвяных осадков перлювиального генезиса.

Пески представлены 4-мя гранулометрическими разновидностями: гравелистыми, чистыми мелкозернистыми, алевроитовыми, а также песчаными микритами.

Гравелистые пески (ГрП) представлены разнозернистыми, практически отмытыми песками со значительной примесью дресвы и отдельными гальками кристаллических пород. Они перекрывают порог, отделяющей Салму от Ругозерской губы. В виде узкой полосы они покрывают южный склон гряды северо-западного простирания на юго-востоке Салмы. Кроме того, в виде мелких локальных пятен они постоянно фиксируются в мелких понижениях грядообразного рельефа в южной части пролива.

Пески чистые (Пм) преимущественно мелкозернистые и плохо сортированные, развиты на глубинах 20-40 м. На севере они покрывают верхнюю часть ровного склона о-ва Великого. Мощность песков небольшая, около 0.5 м. Пески перекрывают глинистые отложения, представляющие плоскости скольжения крупных оползней. В южной части пролива эти пески покрывают выположенные поверхности прибрежных платформ (глубины 30-40 м) и северную окраину интенсивно расчлененной грядовой поверхности на юго-востоке пролива. Они также покрывают выровненные мелководные (глубины до 20-30м) участки на юго-востоке полигна.

Пески алевроитовые (Ап) достаточно широко представлены как на севере, так и на юге пролива. Батиметрически они залегают глубже чистых песков. Полоса алевроитовых песков на северном склоне пролива приурочена в центре к слабосхолмленной поверхности с глубинами 30-50 м, а на северо-востоке – к нижней части склона. Сам склон покрыт целой серией неглубоких рытвин и долинообразных понижений, направленных по нормали к берегу. Видимо, это тальвеги

зерновых потоков, что позволяет предполагать здесь чередование песков алевритовых, алевритовых миктитов и даже тонкозернистых песков с градационной слоистостью. На юге пролива алевритовые пески покрывают большую часть юго-восточного отрога гряды, берущей начало у шхерных островов (глубины 20-30 м), а также бровки прибрежной террасы.

Миктиты песчаные (Мп) развиты в северо-западной части Еремеевского порога. Здесь начинают возрастать скорости придонных течений, одновременно преобладает нефелоидное осадконакопление и происходит частичная разгрузка плавучих льдов. Описываемые отложения можно отнести к палимпсестовым (смешанным с точки зрения генезиса и вещества) осадкам. Песчанистые миктиты покрывают также поверхности ледниковых гряд во внешней части губы Нильма и на южной береговой платформе Салмы и крутые склоны острова Великий.

Тонкозернистые осадки, состоящие преимущественно из алевритовых и пелитовых частиц, количественно преобладают на картируемой площади. Это связано с батиметрическим фактором и наличием большого количества локальных зон с затишными условиями седиментации. Свой вклад вносят и гравитационные процессы, приводящих к ресуспензии большого количества тонкозернистого взвешенного материала.

Песчаные алевриты (ПА) развиты главным образом во внешней части губы Нильма на глубинах 15-30 м. Небольшое поле их выделено также в восточной части прибрежной платформы о. Великий.

Пелитовые алевриты (Пла) оливково-серого цвета со значительной долей частиц алевритовой размерности (более 50%) выделены вдоль подножья северного склона субширотной гряды в срединной части южной береговой платформы пролива. Глубина их распространения 20-25 м. Алевритовые миктиты (Ма) являются одним из наиболее распространенных осадков на описываемой площади. Они развиты глубже 20-25 м. Наибольшее распространение эти осадки получили в центре и на западе южной береговой платформы пролива, а также образуют пятно напротив Еремеевского порога. Формирование этих осадков связано, в первую очередь, со снижением скоростей течения.

Миктиты пелитовые (Мпл) развиты на западе Еремеевского порога перед узостью между мысом Киндо и о. Великий. Это типичный смешанный осадок, где песчанистый ил обогащен большим количеством обломков гравийной и галечной размерности. Он сформировался в условиях нефелоидной седиментации при повышенной подвижности вод. Примесь грубообломочного материала, вероятно, связана с разгрузкой льдов.

Алевропелиты (Апл) - наиболее тонкие донные образования в описываемом районе. Они представлены тонким, маслянистым осадком, практически без примеси песка. Это типичные минеральные илы серого и зеленовато-серого цвета текучей консистенции. Они выполняют

осевую, глубоководную часть пролива. Особое внимание привлекают алевропелитовые осадки, развитые в узкой вытянутой ложбине, располагающейся южнее гряды в центральной части южного макросклона.

#### 4.5 Комплекси́рование результатов исследований для определения геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов<sup>6</sup>

За основу районирования принята морфогенетическая классификация форм и типов рельефа шельфа арктических морей (Никифоров, 2006), детализированная и дополненная с учетом особенностей рельефа дна Белого моря (Никифоров и др., 2012). Рельеф дна рассматривается с точки зрения выделения доминирующих природных процессов, под влиянием которых происходило и происходит формирование и изменение его морфологии. В ходе мелкомасштабного (Варейчук, Игнатов, 1989, Сафьянов, Соловьева, 2005; Государственная..., 2012) и среднемасштабного (Никифоров и др., 2012) геоморфологического картографирования дна Белого моря показано, что современный облик рельефа дна часто является унаследованным или реликтовым. Генезис рельефа целесообразно рассматривать на трех глубинных и временных срезах: структура коренных пород, формы, связанные с экзогенными процессами, современные береговые и субаквальные процессы различной природы. В пределах общего ландшафта Кандалакшского залива проведены идентификация и районирование однородных участков по геолого-геоморфологическим признакам было выполнено в рамках трех рангов ландшафтных выделов: фаций, урочищ и местностей. Принимая во внимание, что биотическая и гидрометеорологическая составляющие ландшафта в явном виде не рассматривались, термины

---

<sup>6</sup> При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

- [1]. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.**, Козупица Н.А. 2018 Строение осадочного чехла Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустики // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология – 20186 – № 2 – с. 81-92. (0,75 п.л., авторский вклад 15%). Импа́кт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298
- [2]. 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%. Импа́кт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298.
- [3]. **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/гео.2024.62.53.010. Импа́кт-фактор журнала в РИНЦ: 0,53.

«фация», «урочище» и «местность» будут употребляться для обозначения геолого-геоморфологических компонентов соответствующего масштабного ранга. Результатами идентификации и районирования являются каталог ландшафтных фаций и карты урочищ и местностей масштаба 1:25000.

Как показано предыдущими исследователями и подтверждено для участка исследований в главе 4.2 особенностями геологического строения района работ являются приповерхностное положение раздробленного фундамента, значительные темпы восходящих движений, различные для разных блоков (Романенко, Шилова, 2012, Романенко, Баранская, 2015, Репкина, Романенко, 2016), современная сейсмичность (Ассиновская, 1994, Балувев и др. 2009, Мараханов, Романенко, 2014), которые определяют наличие структурных форм рельефа всех морфометрических рангов. Строение фундамента: положение его кровли, раздробленность, превышения блоков, преобладающая ориентировка блоков (СЗ) и секущих их нарушений (ССЗ), обуславливают пространственное положение и структуру рельефа как наиболее крупных геоморфологических элементов полигона, так и небольших структурных гряд относительной высотой 1-2 м, отчетливо выраженных на ЦМР и изображениях ГЛБО.

Анализ батиметрической карты показывает, что в пределах исследованной области выделяются два элемента макрорельефа (Рисунок 54). Первым элементом является грабен пролива Великая Салма и его склоны (Рисунок 54, область 1), примыкающий с северо-запада к острову Великий. С юго-запада грабен граничит с мелководным склоном – вторым макроэлементом исследуемого участка (Рисунок 54, область 2).

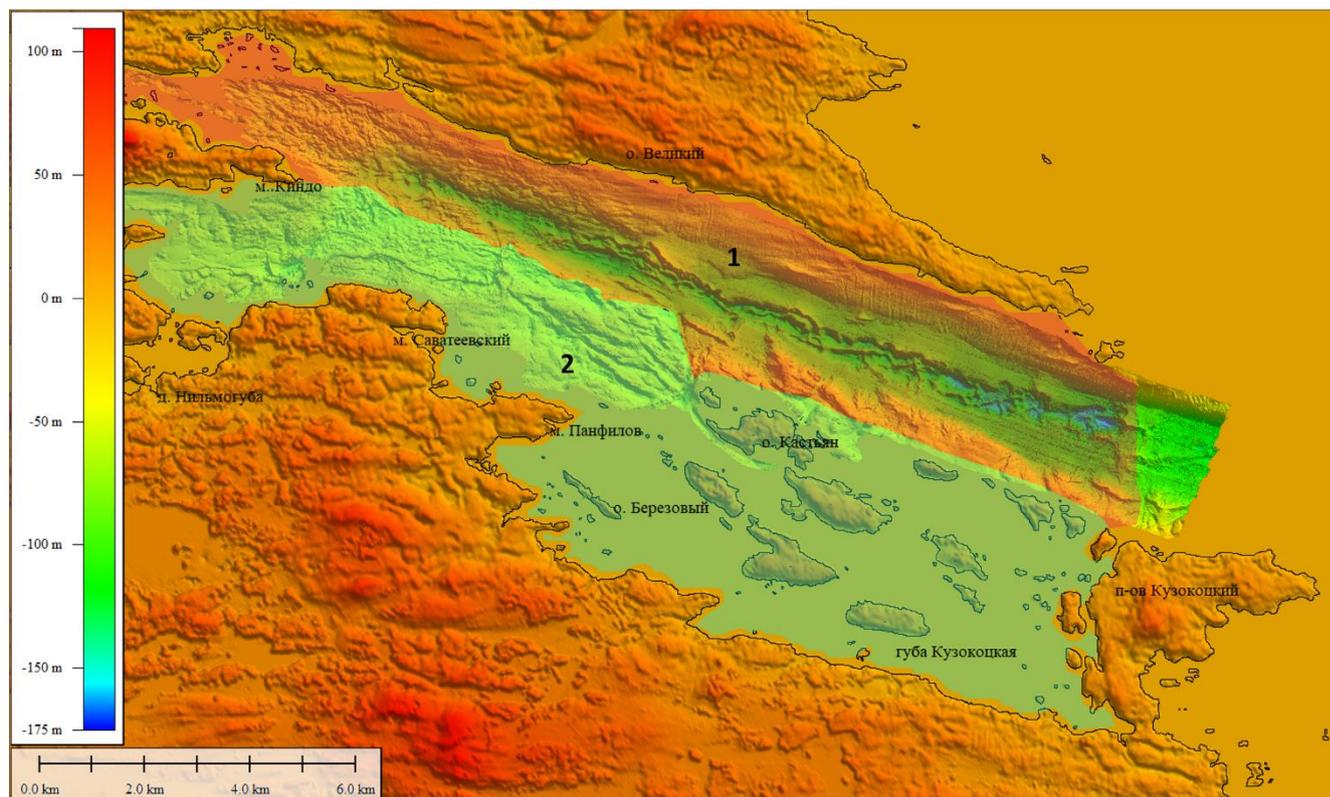


Рисунок 54. Карта основных элементов макрорельефа. Шкала отвечает высотам и глубинам в метрах, пронумерованные цветные области – выделенным макроэлементам.

#### 4.5.1 Идентификация и районирование местностей пролива Великая Салма

На основе идентификации элементов макрорельефа, анализа их пространственного положения, учета геологического строения и тектонического районирования по данным выполненных геофизических исследований было выполнено картирование геолого-геоморфологических компонентов ранга местностей. Базовыми признаками разделения служили:

- территориальная близость;
- общность происхождения;
- схожесть тектоники;
- схожесть доледниковых геологических процессов;
- однородные параметры макрорельефа (углы наклона поверхностей, глубины).

В результате комплексного анализа данных геофизических наблюдений в проливе Великая Салма было определено шесть ландшафтных выделов ранга местностей (Рисунок 55).

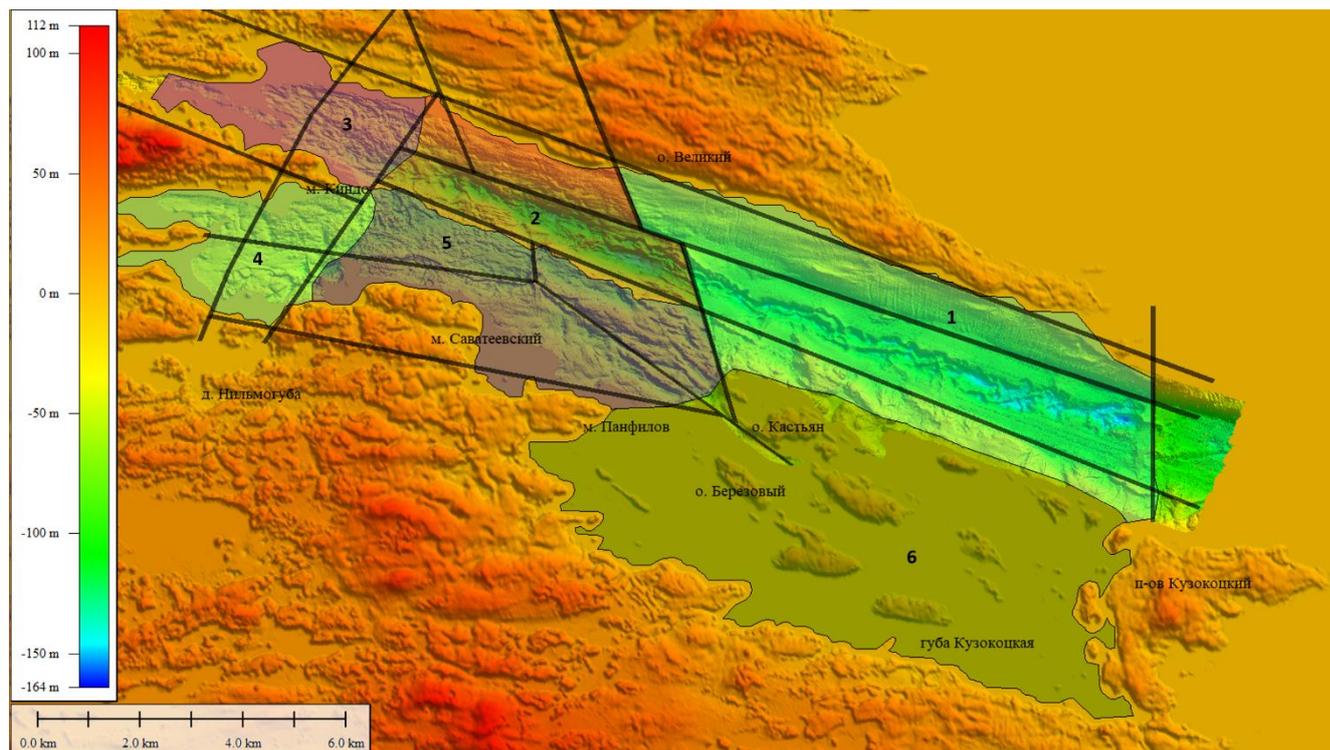


Рисунок 55. Карта ландшафтных выделов, соответствующих масштабу уровню местностей. Цветовая шкала показывает высоты и глубины. Пронумерованные цветные зоны соответствуют ландшафтным выделам ранга местностей (описание дано в тексте). Черным показаны области основных разрывных нарушений.

Местность 1 «Восточная часть грабена Великой Салмы» (Рисунок 55, зона 1). В целом местность представляет собой корытообразную депрессию, осложненную в днище V-образным извилистым врезом (Таблица 9, элемент 6). Глубина днища депрессии изменяется от 120 до 160 м. Северный склон с углом наклона  $\approx 5^\circ$ , осложнен субмеридиональными ложбинами шириной около 30 м и глубиной 1-2 м (Таблица 9, элемент 9) и редкими оползнями. Южный борт со склонами до  $15^\circ$  осложнен полой ступенью с глубиной от 30 до 50 м шириной более 500 м. На склонах от уступа до плоского днища развиты эрозионные врезы и оползневые цирки шириной около 30 м и глубиной до 5 м (Таблица 9, элементы 5 и 12). Восточный край местности открывается в Кандалакшский залив и ограничен Кузокоцким уступом, являющимся продолжением полуострова Кузокоцкий. Западный край характеризуется сменой углов наклона склонов, что, вероятнее всего, связано с проявлением тектонических движений на границах блоков фундамента по разрывному нарушению ССЗ направления. В геологическом плане блоки фундамента перекрыты ледниково-морскими и морскими осадками мощностью до 100 м, фрагментарно встречается маломощный слой ледниковых отложений. На северном борту в разрезе выделяются тела, которые можно отнести к оползневым толщам (Рисунок 56). В днище депрессии в разрезе ледниково-морских и морских осадков видны палеоруслы (Рисунок 57), свидетельствующие об изменении конфигурации врезам в днище пролива.

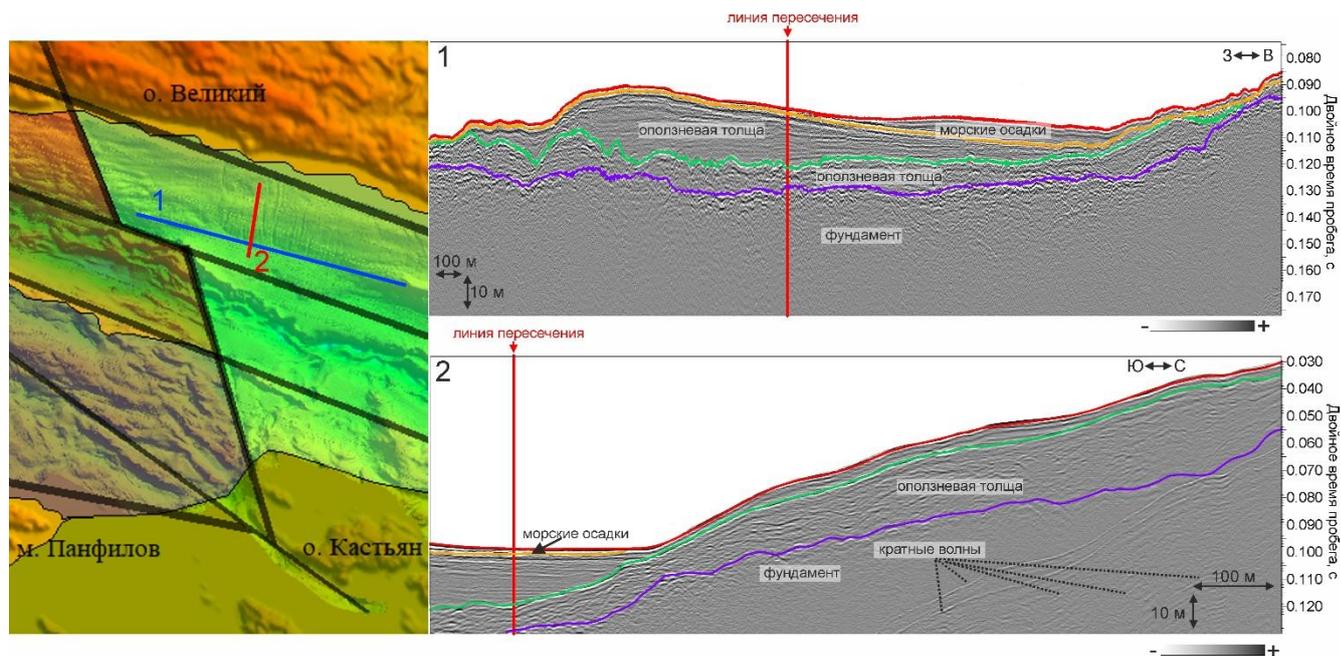


Рисунок 56. Фрагменты профилей ССВР с интерпретацией через северный склон грабена Великой Салмы (1 и 2). Фрагмент ЦМР с положением показанных профилей (слева).

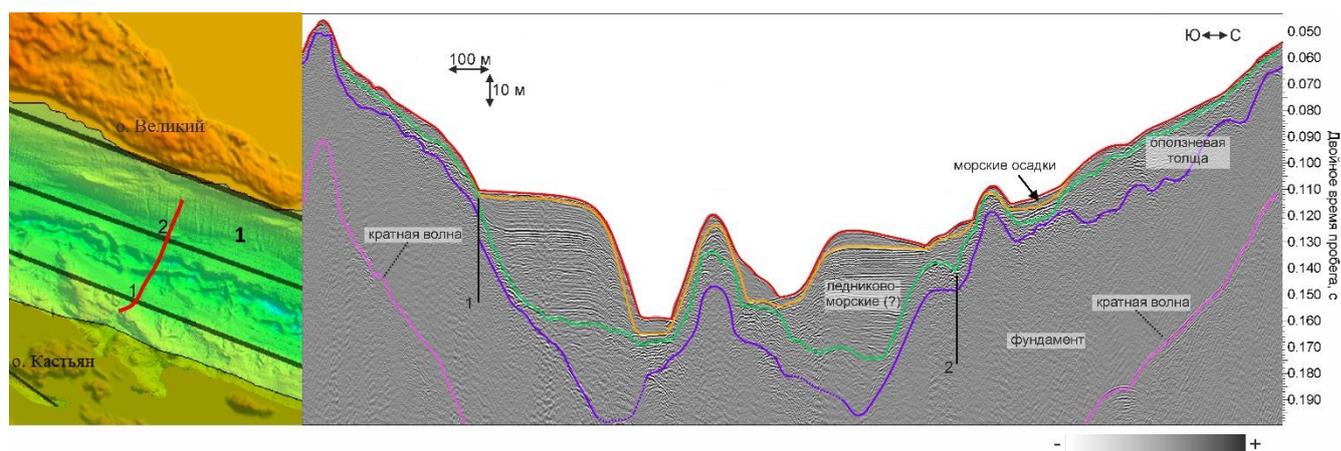


Рисунок 57. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через восточную часть грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

Местность 2 «Центральная часть грабена Великой Салмы» (Рисунок 55, зона 2). В целом, местность представляет собой V-образную депрессию с глубинами дна от 100 до 120 м, где находится серия U-образных впадин глубиной до 20 м. Северный склон с углами наклона  $\approx 6-7^\circ$ , осложнен многочисленными оползевыми телами субширотного простирания с характерными размерами 100-200 м в ширину, и с длиной превышающей сотни метров (Таблица 9, элемент 4). Южный склон характеризуется углами до  $8^\circ$  и заканчивается на глубине 40 м на локальной гряде предположительно ледникового происхождения, переходя на равнину, относящуюся к другой местности. Западная часть Местности 2 представлена склоном с углами наклона от  $3^\circ$  до  $5^\circ$ . Мощность ледниково-морских и морских осадков уменьшается по восстанию склона от 30 м до 0 м. Граница местности отнесена к переходу от склона на равнину глубиной 25 м. На блоках

кристаллического фундамента повсеместно залегает слой моренных отложений мощностью от 5 до 30 м. Ледниковые отложения перекрыты неравномерным слоем ледниково-морских и морских осадков мощностью до 25 м (Рисунок 58, Рисунок 59). Замыкание пролива структурно обусловлено поднятием блоков фундамента СВ простирания. Кроме того, на сейсмоакустических данных в сравнительно мощных ледниково-морских и морских осадках отчетливо выделяются газонасыщенные зоны с возможным газопроявлением на морском дне.

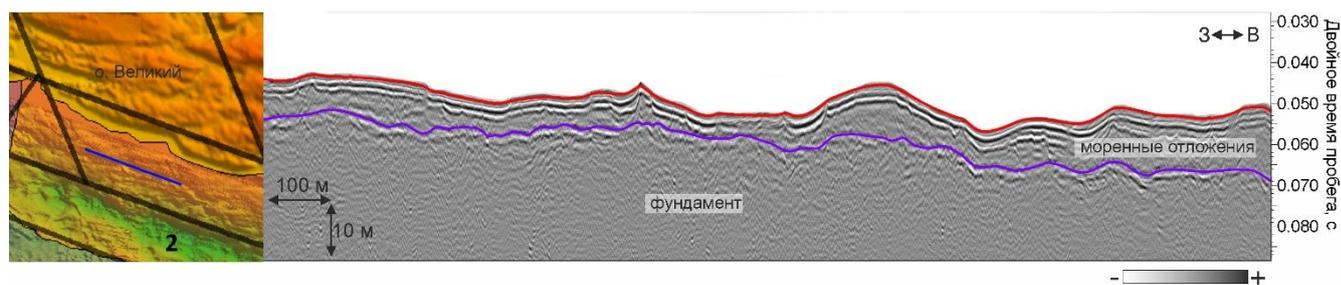


Рисунок 58. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через северный склон центральной части грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

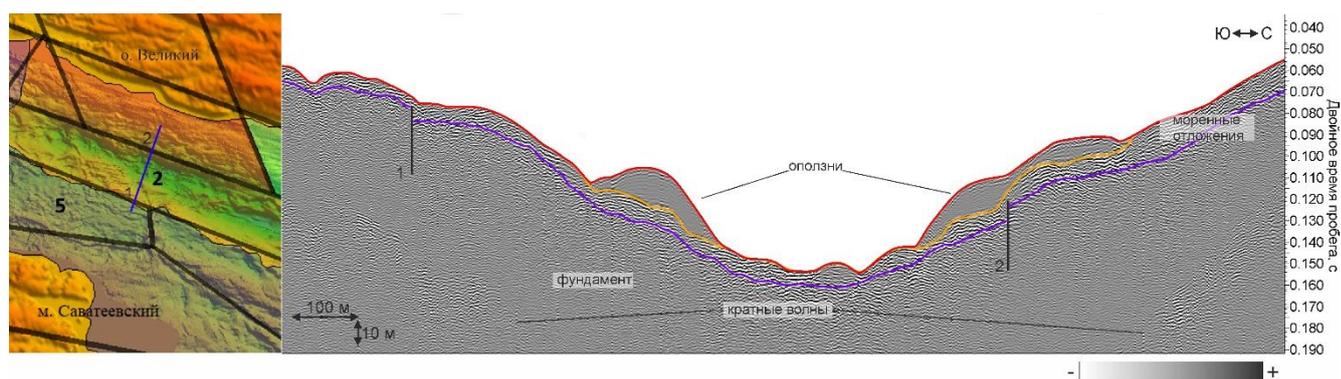


Рисунок 59. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через тальвег центральной части грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

Местность 3 «Западная часть пролива Великой Салмы» (Рисунок 55, зона 3). Участок с запада ограничивается Еремеевским порогом, с южной – скальными берегами м. Киндо, а с северной – мелководными губами о. Великий. В целом местность представляет собой поднятие с уплощенной изрезанной вершиной на 20 м и склонами 3-6° с подножием на 30-50 м. Местность приурочена к относительно приподнятому блоку фундамента, на котором залегают моренные отложения мощностью до 30 м (Рисунок 60), ледниково-морские и морские осадки практически отсутствуют. Узкие гряды высотой 2-3 м северо-восточного направления могут быть интерпретированы, как морены Де Гира (Таблица 9, элемент 7).

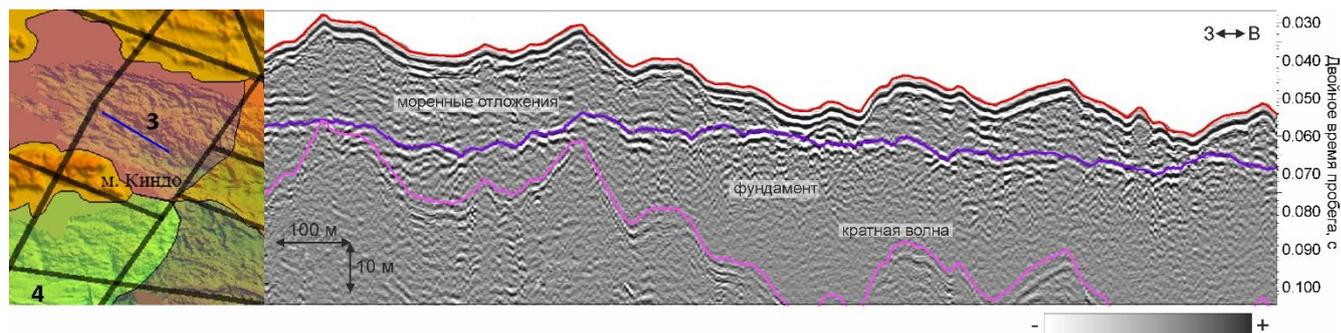


Рисунок 60. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через западную часть грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

Местность 4 «Нильменско-Причерноморская» (Рисунок 55, зона 4). Участок представляет собой приустьевую полого-наклонную равнину с глубинами до 30 м, включающую губу Кислая, и ограниченной с севера южным склоном м. Киндо. На востоке местность ограничена сбросом северо-восточного простирания амплитудой  $\approx 20$  м. Северо-восточная часть имеет расчлененный рельеф и осложнена узкими (около 20 м) грядами высотой 1-3 м северо-северо-восточного направления, что объясняется выходом моренных отложений на поверхность (Рисунок 61). Центральная часть представляет собой равнину с наклоном не более  $1^\circ$ , где выявлены структурно-предопределенные ложбины (Таблица 9, элемент 10) длиной до 1 км и глубиной до 10 м (Рисунок 61). В южной и юго-восточной части местности находятся флювиогляциальные гряды длиной до 1,5 км и высотой до 15 м (Таблица 9, элемент 1).

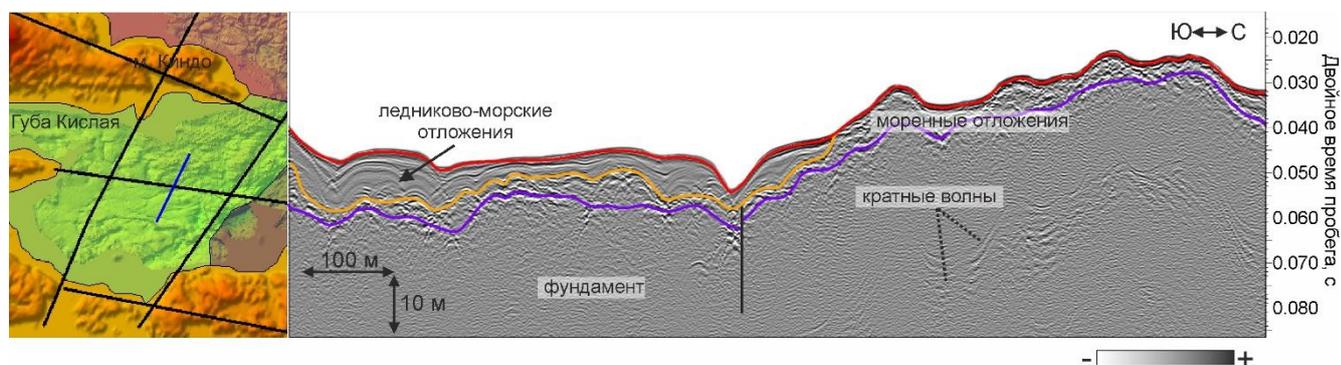


Рисунок 61. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через Нильменско-Причерноморскую местность (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

Местность 5 «Панфилово-Саватеевская равнина» (Рисунок 55, зона 5). Участок полого-наклонной равниной с глубинами от 20 до 50 м, ограниченной в плане (против часовой стрелки) мысами Киндо, Саватеевский, Панфилов, и островами Березовый, Кастьян (Рисунок 54, область 2). В северо-западной части это полого-наклонная холмисто-западинная равнина (высота/глубина отдельных поднятий и впадин 10-15 м), которая окаймляется с юга и востока флювиогляциальной грядой длиной более 4 км и высотой 10-20 м (Рисунок 62). В прибрежной

части местность представлена склоном, выполаживающимся мористее, осложненным редкими узкими грядами высотой до 1.5 м северо-северо-западного направления и структурно-предопределенными промоинами длиной до 1 км и глубиной до 7 м. Вблизи острова Кастьян на глубине 5-30 м выделена серия гряд западно-северо-западного простирания. Каждая гряда имеет ширину 100-150 м и высоту 20-30 м, уклоны склонов при этом достигают 30° (Рисунок 63).

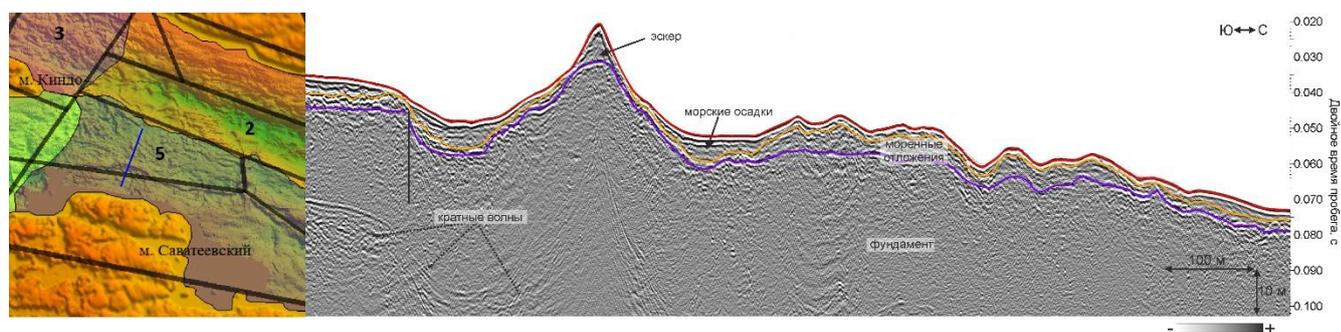


Рисунок 62. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через северо-западную часть Панфилово-Саватеевской равнины (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

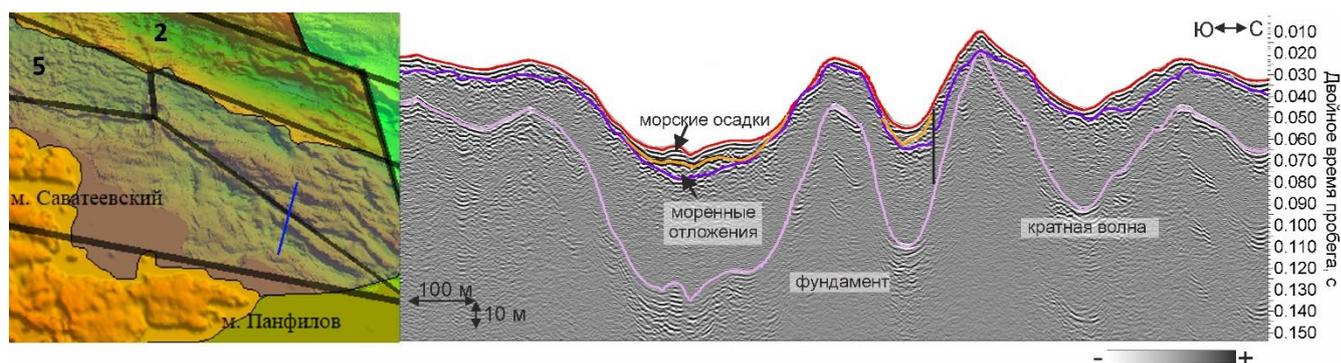


Рисунок 63. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через юго-восточную часть Панфилово-Саватеевской равнины (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева).

Местность 6 «Мелководье губы Кузокоцкая» (Рисунок 55, зона 6). Участок представляет собой прибрежную равнину, характеризуется глубинами до 10 м и многочисленными мелями. С юга ограничен берегом материка, с запада – мысом Панфилов, с востока – мысом Кузокоцкий. На севере эта область граничит с местностью 1 по изобате 10 м. В пределах района наблюдается множество островов.

Для выделения урочищ - ландшафтных выделов размером от 0,5–3 до 10–20 км<sup>2</sup>, территориально и генетически связанных совокупностей фаций в пределах местностей необходимо было идентифицировать геолого-геоморфологические компоненты ранга фаций.

#### 4.5.2 Идентификация фаций пролива Великая Салма

При изучении подводных ландшафтов термин «фация» используется, как определение масштабного уровня (ранга) ландшафтных выделов от десятков до сотен квадратных метров (СП 502.1325800.2021, 2021).

Согласно Большой российской энциклопедии (БРЭ): «Подводная фация представляет собой конкретный биотоп, связанный с одной формой микрорельефа или одним элементом мезорельефа (вершина, склон, подножье банки), и расположена в определённом сравнительно небольшом интервале глубин. Фация сложена одной литологической разностью современных осадков или приурочена к однородному по вещественному составу выходу горных пород и занята одним подводным биоценозом» (Большая российская энциклопедия, 2004-2017).

По одному из определений «фация» – комплекс отложений, отличающихся составом и физико-географическими условиями образования от соседних отложений того же стратиграфического отрезка (Крашенинников, 1971). В данном определении прежде всего фация — это комплекс отложений, имеющих определенный вещественный состав (литологический и палеонтологический), протяженность, мощность, форму в плане и геологический возраст. Многие исследователи подчеркивают, что физико-географический аспект, то есть условия осадконакопления, для идентификации геологической фации имеет решающее значение (Крашенинников, 1971).

В данной работе рассматриваются только геолого-геоморфологические компоненты подводных ландшафтов, поэтому, при исследовании на масштабном уровне фаций, выдел, отвечающий ландшафтной фации, определялся в соответствии со следующими признаками:

- территориальная близость;
- общность происхождения;
- диапазон изменения глубины;
- схожесть литологии и постоянство литодинамического процесса;
- схожесть послеледниковых геологических процессов;
- наличие характерных совокупностей элементов микрорельефа.

Согласно Е.Н. Невесскому, В.С. Медведеву и В.В. Калининко (Невесский, 1977), на акватории Белого моря выделяются: 1) фации пляжей (не относятся к морским фациям); 2) прибрежную фацию; 3) фации дельт и предустьевых районов; 4) фации заливов; 5) фацию обширных морских мелководий; 6) фации склонов впадины моря; 7) фации срединной части впадины моря.

В настоящей работе в результате геолого-геофизических исследований, отвечающих требованиям картирования масштаба 1:25000 и крупнее, фациальная структура, предложенная

ранее, была адаптирована на масштаб пролива Великая Салма и детализирована в соответствии с условиями формирования и современного развития экзогенных и эндогенных геологических процессов.

Результаты данного исследования должны стать основой для дополнения гидрометеорологической и биологической информацией, поэтому важно уже на этапе определения геолого-геоморфологических компонентов учитывать экологическую вертикальную зональность и глубины воздействия волн.

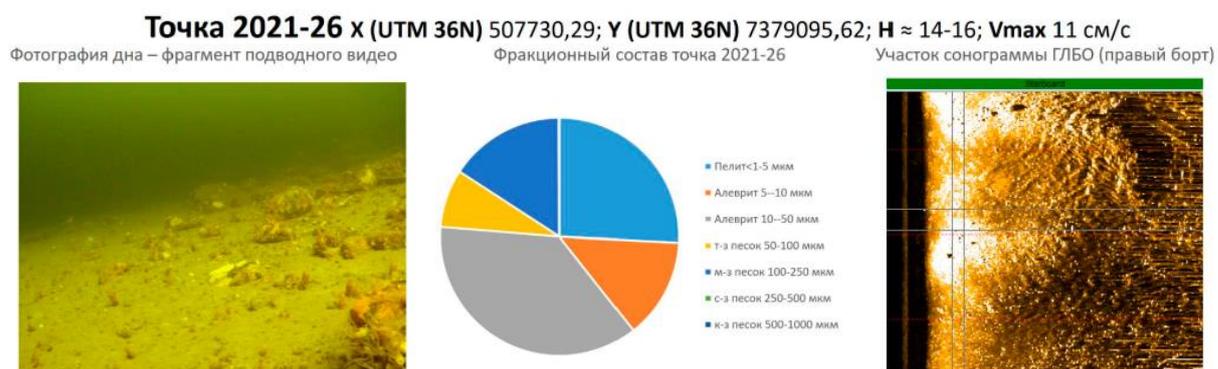
В морских водоемах принято выделять вертикальные зоны. Применительно к Белому морю ими являются (Наумов, 1993):

- Литораль, приливная зона; глубины в среднем от  $-1.8$  до  $0$  м.
- Верхняя сублитораль, или фиталь, зона распространения макрофитов; глубины в среднем от  $0$  до  $20$  м.
- Нижняя сублитораль, верхний отдел афотической зоны, область материкового шельфа; глубины в среднем от  $20$  до  $100$  м.

Ветровое волнение действует от  $2$  до  $10$  м (Наумов, 1993). Эту зону данное исследование не затрагивает.

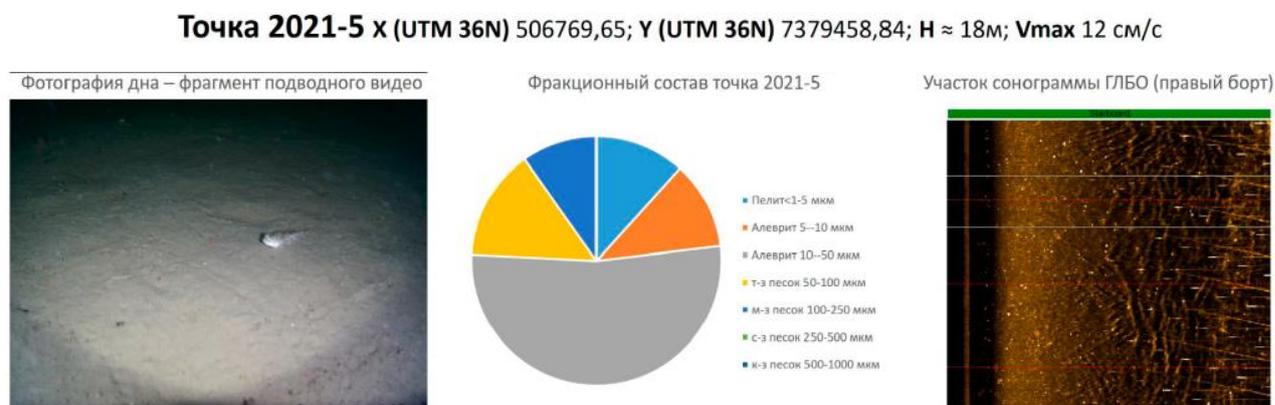
По мнению автора, в пределах пролива Великая Салма Кандалакшского залива по гидроакустическим и геологическим данным, заверенным фото- и видеонаблюдениями, выделяются 24 разности, соответствующие по масштабному уровню ландшафтной фации (далее – фация).

Фация 1 - это полого-наклонная равнина с глубинами до  $20$  м, где преобладают денудационные процессы, обусловленные интенсивными волновыми и приливо-отливными течениями. Зона приурочена к воздымающимся выступам фундамента. Поверхностный слой осадков представлен грубообломочными разностями (валунно-галечными отложениями, гравием, дресвой, песками и микритами гравийными) ледникового происхождения, основанием служат породы архей-протерозойского кристаллического фундамента. Рельеф дна осложнен мелкими грядами ледникового происхождения (морены Де Гира) (Старовойтов и др., 2022). Наиболее значимые по площади участки этой зоны находятся на западной и северо-западной частях площади.



*Рисунок 64. Фация 1 грядовая равнина*

Фация 2 представляет собой транзитно-аккумулятивную флювиальную равнину на глубинах 20-40 м, осложненную структурно-предопределенными ложбинами, приурочена к осям разломов или опущенному блоку фундамента (Рисунок 65). Поверхностный слой осадков представлен миктитами алевритовыми и алевритами, основанием служит слой морских и леднико-морских осадков. Это участки активного гидродинамического режима. Примером подобных условий может служить участок разгрузки рек Черная и Нильма.



*Рисунок 65. Фация 2 – ложбина*

Точка 2021-18 x (УТМ 36N) 507418,28093; y (УТМ 36N) 7378415,06828; Н ≈ 31 м; Vmax 13 см/с

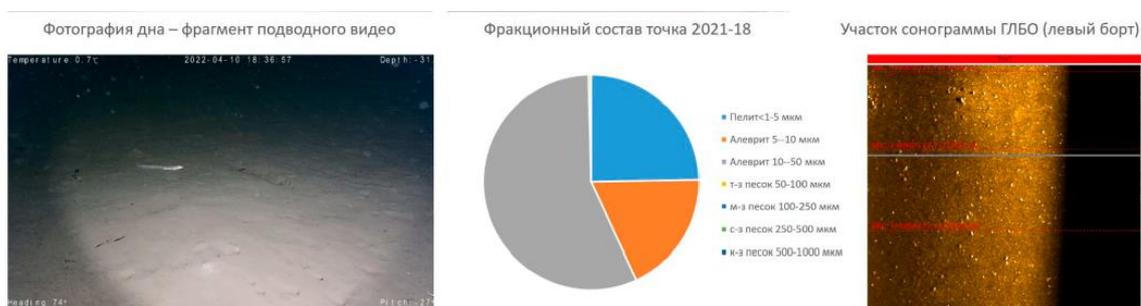


Рисунок 4.8. Данные для точки 18. Фация - аккумулятивная флювиальная равнина.

### Рисунок бб. Фация 2 - транзитно-аккумулятивная флювиальная равнина

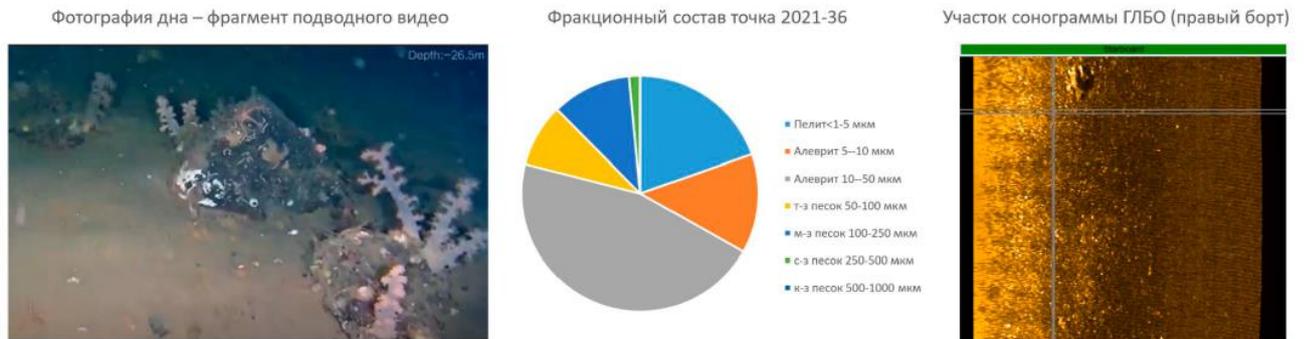
Фация 3, по признакам схожа с Фацией 2, но характерна для больших глубин. Фация 3 представляет собой аккумулятивную флювиальную равнину на глубинах 40-60 м, приуроченную к осям разломов или опущенному блоку фундамента, осложненную структурно-предопределенными ложбинами. Состав поверхностного слоя осадков представлен песками мелкими и миктитами, основанием служит слой морских и леднико-морских осадков. Примером подобных условий могут служить участки окаймляющие выступ фундамента в Панфилово-Саватеевской местности.

Фация 4 - это структурно-денудационная равнина на глубинах 15-35 м, образованная горстообразными выступами фундамента северо-западной ориентировки, фрагментарно прикрытыми ледниковыми отложениями малой мощности, часто полностью обнаженные. Поверхности и крутые склоны гряд покрыты тонким прерывистым чехлом перлювиальных валунно-галечных и песчано-галечных грунтов, формирующихся или сформировавшихся рядом друг с другом в условиях интенсивного размыва. Подножия склонов занимают мелкие и алевроитовые пески. Структурные впадины между грядами и мелководья в тылу гряд заполнены песчано-алевритовыми морскими осадками, формирующимися в ходе флювиальной и нефелоидной аккумуляции в локальных седиментационных ловушках. Батиметрическая зональность в распределении осадков нарушена сложным режимом течений, следующих вдоль оси пролива и огибающих крутые гряды.

Фация 5 - аккумулятивно-денудационная холмистая равнина на глубинах от 30 до 50 м. Геологическое строение и рельеф таких областей осложнены водно-ледниковыми формами, а именно моренными холмами и озами (эскерами), которые могут быть частично перекрыты ледниково-морскими и морскими отложениями. В углублениях кровли моренных отложений

наблюдается увеличение мощности «мягких» осадков, что выражается также в сглаженности микрорельефа поверхности морского дна. Слой донных отложений алевритового и алевропелитового состава.

**Точка 2021-36 х (УТМ 36N) 508561,12; Y (УТМ 36N) 7378473,97; Н ≈ 27 м; Vmax \_см/с**



*Рисунок 67. Фация 5 - аккумулятивно-денудационная холмистая равнина*

Фация 6 представлена ландшафтными выделами, близкими к понятию фации «срединной части впадины моря», находится на глубинах от 90 до 130 м. Это структурно-обусловленная эллипсовидная в плане впадина с U-образным поперечным профилем, покрытая алевритовыми пелитами. В таких областях морские осадки образуют почти гладкую поверхность и залегают на моренных отложениях небольшой мощности.

Фация 10 – это сложно устроенный врез в постледниковых отложениях глубиной 25-30 м с V-образным поперечным профилем, находящийся на глубинах более 100 м. Сформирована осадочными потоками, передвигающимися по дну под влиянием придонных течений. Основанием служит мощная оползнева? толща (Старовойтов и др., 2018б), поверхностные осадки представлены пелитовыми алевритами.

Склоны в проливе Великая Салма разделяются по глубине: прибрежные до 10 м, мелководные от 10 до 30 м, глубоководные от 30 до 100 м. Преобладающие процессы и мезорельеф зависят от крутизны склона и наличия «мягких» (ледниково-морских и морских) осадков (Таблица 11).

Так мелководные (от 10 до 30 м) склоны делятся на пологие и средней крутизны. В случае склонов до 5° (Фация 11) на поверхности присутствует слой ледниково-морских или морских осадков, микрорельеф сглажен, при этом геологический пробоотбор и визуальные наблюдения показывают наличие валунно-галечных и песчаных отложений.

В случае склонов 5-10° на глубинах 15-25 м (Фация 12) «мягких» осадков не наблюдается, на поверхность выходят моренные отложения, за счет чего мезорельеф становится неровным,

изрезанным. Наблюдаются морены Де Гира. В таких областях условия седиментации определяют приливно-отливные течения, что приводит к транзиту материала и перемыву подстилающих отложений. В фракционном составе преобладает валунно-галечная размерность.

Для глубоководных склонов средней крутизны ( $5-10^\circ$ ) (Фация 13) характерны изрезанная поверхность, фрагментарное наличие «мягких» отложений, гляциальный тип субстрата, и преобладание валунно-галечных отложений на поверхности дна.

Для глубоководных пологих (до  $5^\circ$ ) склонов характерно наличие субпараллельных ложбин зерновых потоков. В таких областях присутствует тонкий слой ледниково-морских отложений, представленных песчаными алевритами. Преобладает транзит осадочного материала. В районе исследований такие склоны занимают широкий диапазон глубин от 30 до 100 м. Фации 14 соответствуют глубины 30-50 м, Фации 15 – глубины 50-100 м.

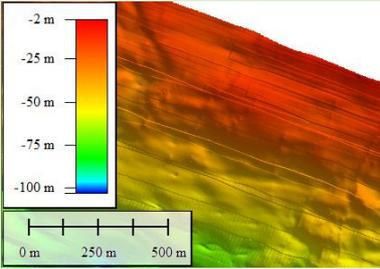
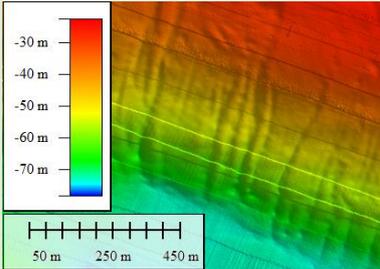
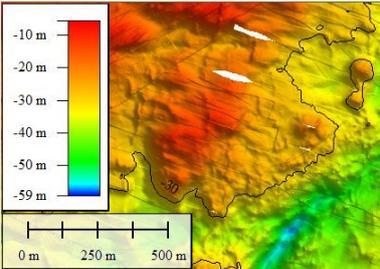
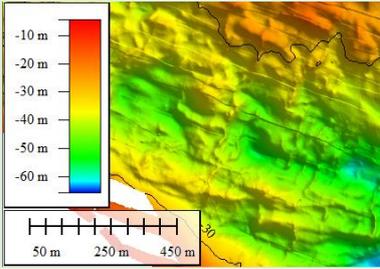
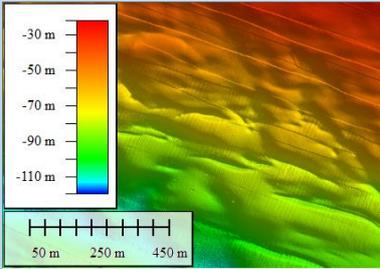
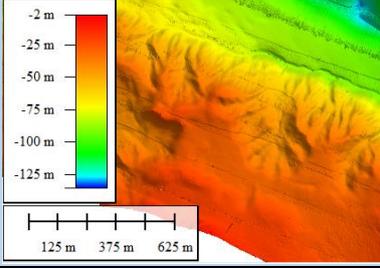
Фации 16 и 17 также относятся к склоновым образованиям, глубины моря от 30 до 50 м и от 50 до 100 м (соответственно) с уклоном  $5-10^\circ$ . Сложены ледниково-морскими и морскими осадками, которые подвергаются гравитационным процессам: образуются оползневые тела. Поверхностные осадки представлены алевритовыми миктитами и песками алевритовыми.

Фации 18 и 19 разделяются по диапазонам глубин 30-50 м и от 50-100 м (соответственно), и представляют собой склоны с уклонами более  $12^\circ$ . Генетически преобладают ледниково-морские и морские осадки. Для фаций 18 и 19 характерно наличие эрозионных врезов и цирков оползней, осадки представлены алевритовыми миктитами.

Фация 20 - неровный волнисто-ступенчатый склон с перепадом глубин от 40 до 70 м. В основании разреза залегает кристаллический фундамент, а перекрывающие их ледниковые и надледниковые отложения существенно осложнены гравитационными процессами. Поверхностный слой осадков представлен алевритовыми миктитами, песчаными алевритами и алевритовыми пелитами. К этим выделам можно отнести участки северного и южного склона в западной части грабена пролива.

Фации 21 и 22 представлены крутыми денудационными склонами в диапазонах глубин 30-50 м и 50-100 м (соответственно), приуроченными к разлому между поднятым и опущенным блоками фундамента. Поверхностный слой осадков представлен алевритовыми миктитами, основанием служит тонкий слой моренных отложений или кристаллический фундамент. Эти выделы встречаются в восточной части южного борта пролива.

Таблица 11. Примеры склоновых фаций

Практически отсутствуют «мягкие» осадки	Мелководные 10-30м	Глубоководные 30-100м
Угол наклона 1-5°	<p>Фация 11</p> 	<p>Фации 14 и 15</p> 
Угол наклона 5-10°	<p>Фация 12</p> 	<p>Фация 13</p> 
Мощный слой «мягких» осадков	Мелководные 10-30м	Глубоководные 30-100м
Угол наклона 5-10°	-	<p>Фации 16 и 17</p> 
Угол наклона 10-20°	-	<p>Фации 18 и 19</p> 

Фация 23 (промоины) обычно, приурочена к границе борта опущенного блока фундамента, характеризуется глубинами 50-60 м, и представляет собой узкую ложбину. Поверхностный слой осадков представлен пелитовыми алевроитами (Рисунок 68).

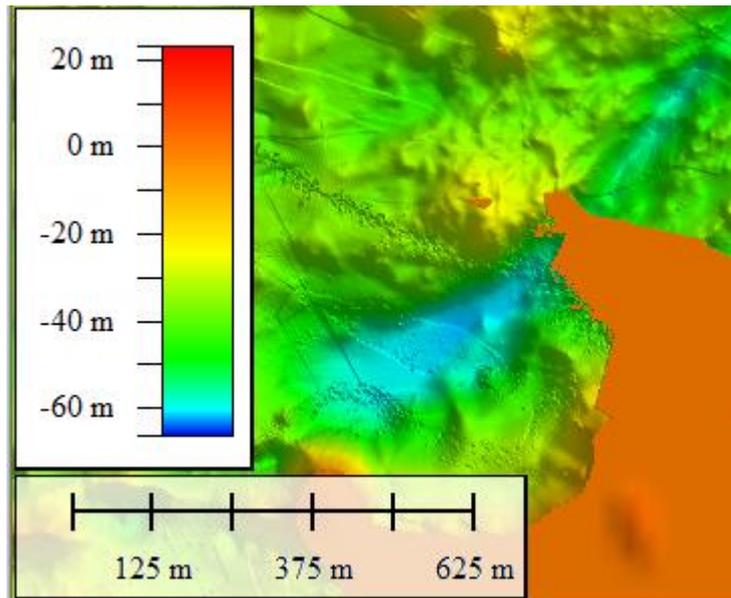


Рисунок 68. Пример фации 23 – промоина.

Фации 24 – глубоководная (80-100м) полого-наклонная аккумулятивная равнина со сглаженным рельефом, представленная отложениями гравитационных процессов различного типа (оползневых, в виде обломочных и грязевых потоков и т.д.) – песчаными алевритами, алевритовыми миктитами и пелитовыми миктитами.

Пляжные и мелководные прибрежные фации до глубин моря 10 м не являлись предметом настоящей работы, однако, на основании анализа батиметрических карт и небольшого объема фото- и видеонаблюдений были картографированы и включены в общее ландшафтное деление на уровне местностей.

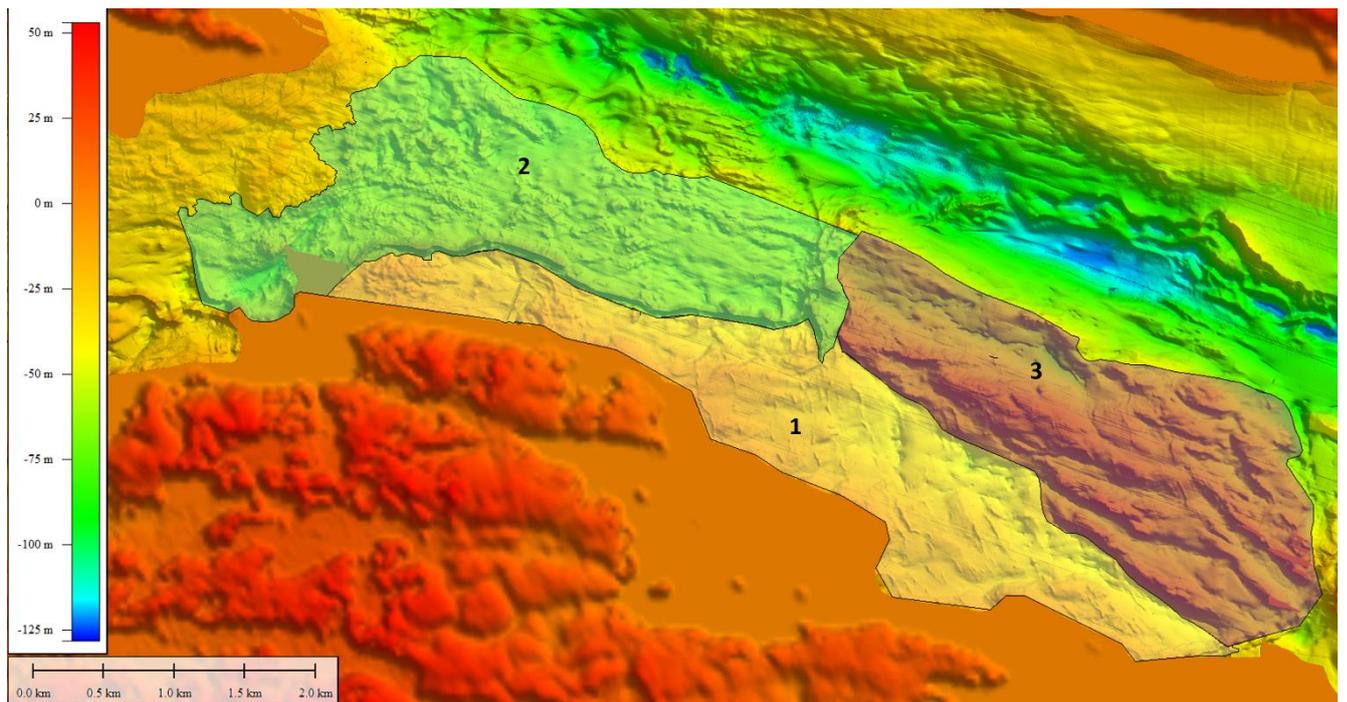
#### 4.5.3 Идентификация и районирование урочищ пролива Великая Салма

Согласно БРЭ «Подводное урочище – это донный природный комплекс, связанный с определённой мезоформой рельефа, обладающий хорошо выраженными границами» (Большая российская энциклопедия, 2004-2017). При определении границ геолого-геоморфологических компонентов ландшафтных выделов уровня урочищ необходимо также основываться на постоянстве следующих признаков:

- территориальная близость;
- общность происхождения;
- диапазон изменения глубины до 30 м;
- схожесть геологического строения;
- схожесть позднеледниковых геологических процессов;
- наличие характерных совокупностей элементов мезорельефа.

Для выделения таксонов более низкого порядка для местности 6 мелководье губы Кузокоцкая не хватает данных многолучевого эхолотирования и достаточного объема сейсмических наблюдений.

В пределах местности 5 выделяется три района ранга урочищ по описанным характерным совокупностям форм мезорельефа и фациям: прибрежный склон (урочище 5.1), холмисто-западинная равнина (урочище 5.2) и равнина с горстообразными выступами (урочище 5.3) (Рисунок 69).



*Рисунок 69. Карта урочищ Панфилово-Саватеевской местности.*

Южный прибрежный склон (урочище 5.1) имеет разные углы наклона, глубины от 10 до 30 м, осложнен ложбинами (Фация 3). По большей части площади присутствуют моренные отложения, частично выходящие на поверхность (Фация 12).

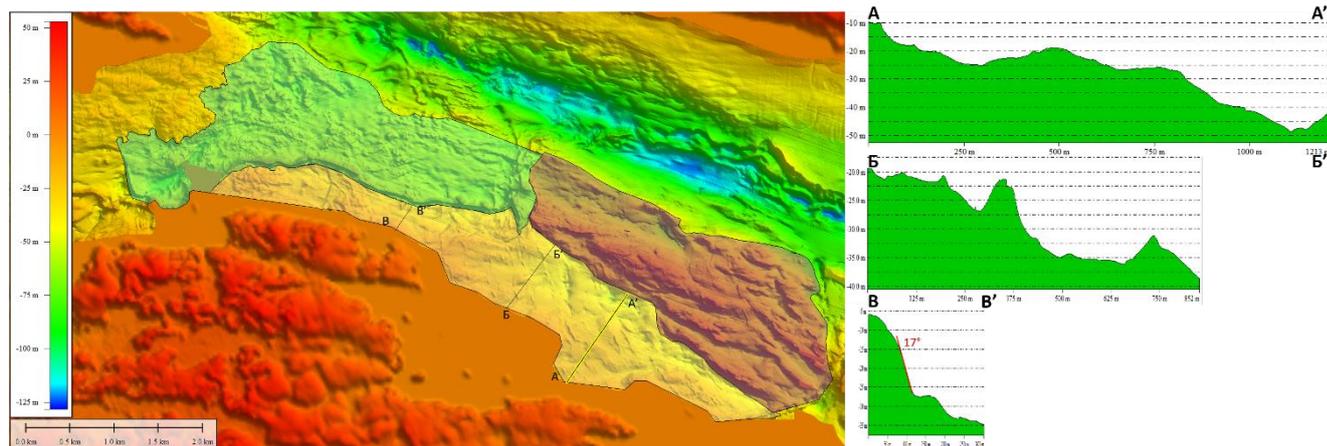


Рисунок 70. Профили рельефа через урочище Южный прибрежный склон (слева). Справа на карте положения разрезов.

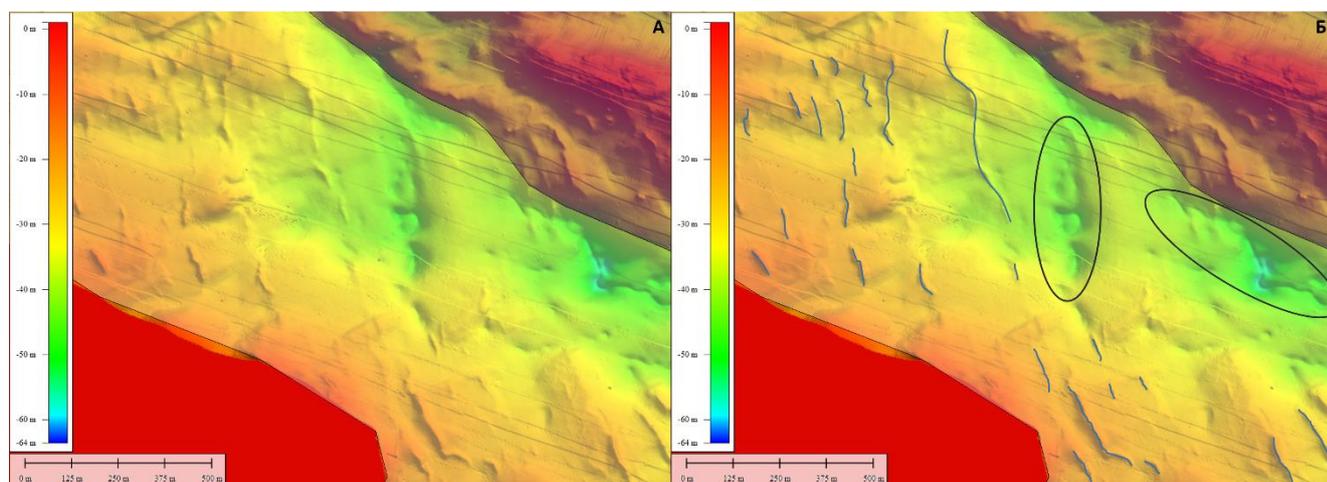


Рисунок 71. Пример выделения форм мезорельефа на батиметрической карте: линии – морены Де Гира, овалы – структурно-предопределенные ложнины. (А) - без интерпретации. (Б) – с интерпретацией. Цветовая шкала показывает глубины.

Урочище 5.2 представляет полого-наклонную холмистую равнину на глубинах от 30 до 50 м. Можно утверждать, что данная область находится в пределах одного слабораздробленного блока фундамента. Моренные отложения имеют площадное распространение, с преобладающей мощностью около 5 м. Наблюдаются моренные холмы и протяженный оз (эскер), которые могут быть как частично перекрыты ледниково-морскими и морскими отложениями, так и выходить на поверхность морского дна (Фация 5).

По отношению к соседним участкам урочище 5.3 относится к приподнятому блоку фундамента. Этот участок представляет собой равнину на глубинах 15-35 м. Чередование выступов с крутыми склонами (до  $25^\circ$ ) и впадин формирует узнаваемый мезорельеф (Фация 4). Моренные отложения встречаются фрагментарно, мощность их достигает 30 м.

Местность 1 Восточная часть грабена Великой Салмы делится на 5 урочищ (Рисунок 72):

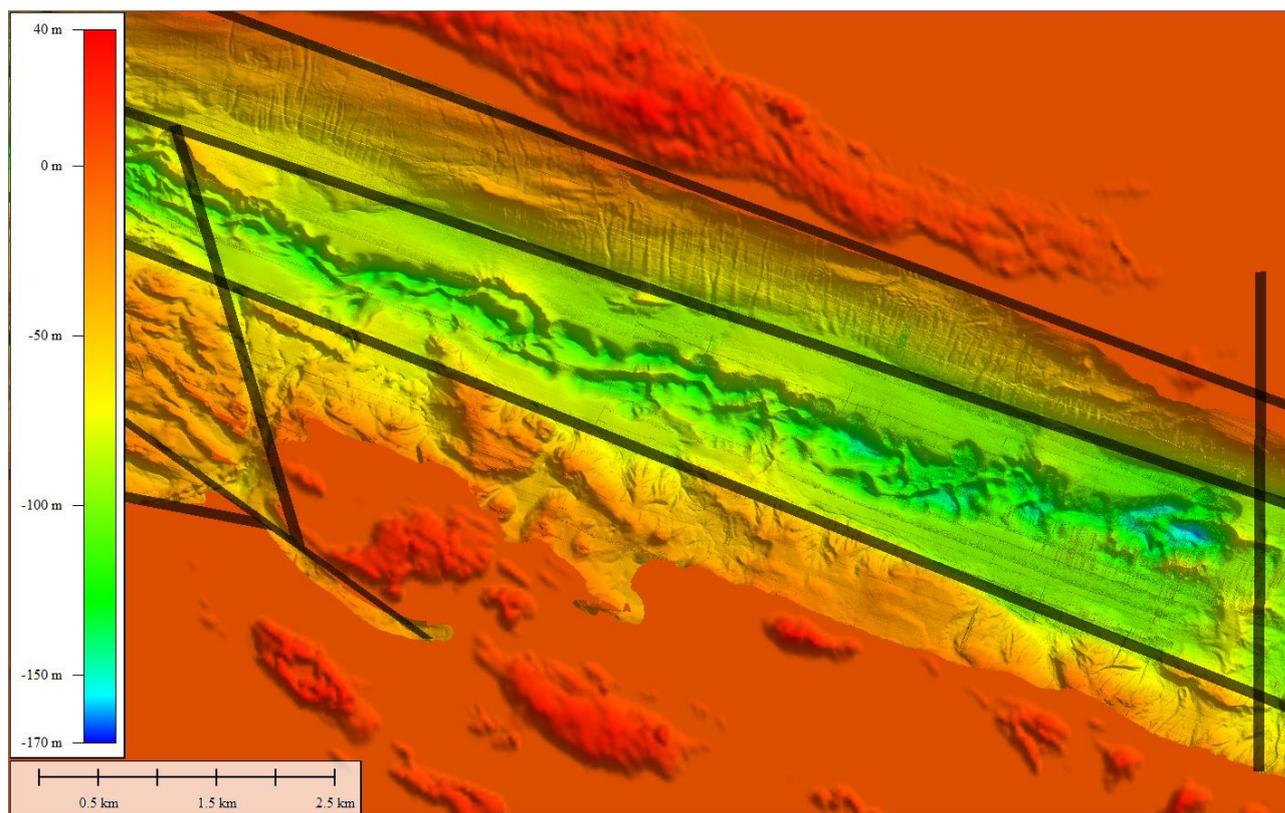
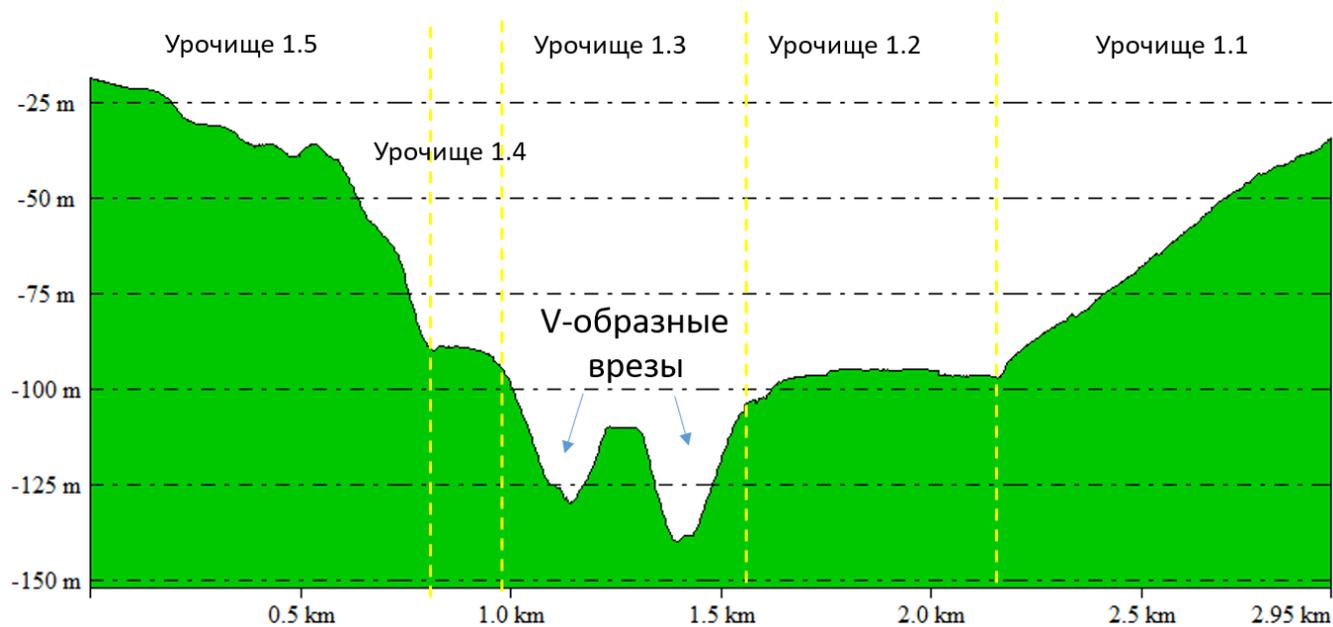


Рисунок 72. Профиль рельефа через восточную часть пролива (вверху), положение профиля на карте рельефа (внизу)

Урочище 1.1 - восточная часть северного склона пролива (Местность 1 «Восточная часть грабена Великой Салмы») – представляет собой склон, осложненный ложбинами зерновых потоков и единичными оползневыми телами (фация 14).

Урочище 1.2 - северная аккумулятивная равнина восточной части пролива (Местность 1 «Восточная часть грабена Великой Салмы»), где углы наклона не превышают  $2^\circ$ . Данная область осложнена несколькими крупными оползневыми телами (фация 24). На этом участке мощная толща ледниково-морских и морских осадков выходит на поверхность и подстилается оползневой? толщей (Старовойтов и др., 2018б) или моренными отложениями.

Урочище 1.3 - восточная часть днища пролива (Местность 1 «Восточная часть грабена Великой Салмы») – представляет собой сложно устроенный врез с V-образным поперечным профилем (Фация 10).

Урочище 1.4 - южная аккумулятивная равнина восточной части пролива (Местность 1 «Восточная часть грабена Великой Салмы») с углами наклона не более  $2^\circ$ . На этом участке мощная толща ледниково-морских и морских осадков выходит на поверхность и подстилается моренными отложениями.

Урочище 1.5 - восточная часть южного склона пролива (Местность 1 «Восточная часть грабена Великой Салмы») – представляет собой полого-наклонную ступень (фация 2), на крутом склоне которой наблюдаются фации оползневых цирков и эрозионных ложбин (фация 17).

Местность 2 «Центральная часть грабена Великой Салмы» разделяется на три урочища (Рисунок 73).

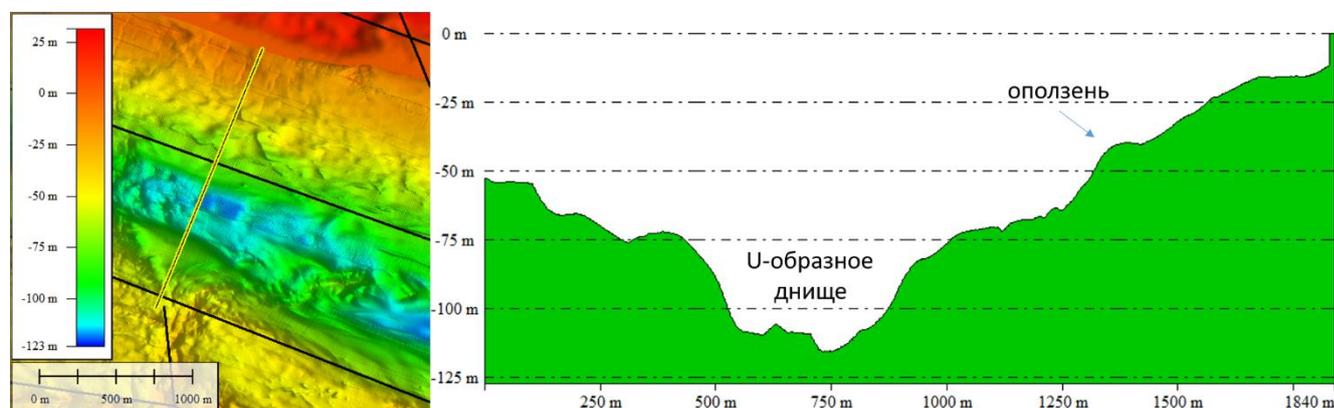


Рисунок 73. Профиль рельефа через местность «Центральная часть грабена Великой Салмы»

Урочище 2.1 северный склон центральной части пролива имеет уклон около  $4^\circ$ . Рельеф осложнен узкими грядами, предположительно моренами Де Гира (Старовойтов и др., 2022). В этой области на выступе фундамента залегают моренные отложения.

Урочище 2.2 склоны центральной части пролива – включает в себя северный и южный склоны и замыкание пролива, их объединяет крутизна от  $4,5^\circ$  до  $6^\circ$  и наличие оползней (фация 16). На моренных отложениях залегают ледниково-морские и морские осадки.

Урочище 2.3 - западная часть днища пролива - представляет собой серию эллипсовидных впадин U-образного профиля (фация 6), разделенных грядами различного происхождения (Терёхина и др., 2024).

Урочище 3.1 - это прибрежная полого-наклонная равнина Местности 3 «Западная часть грабена Великой Салмы» с глубинами до 30 м. Зона приурочена к воздымающемуся выступу фундамента (фация 12). На кристаллическом фундаменте залегают моренные отложения мощностью до 50 м. «Мягкие» осадки отсутствуют.

Местность 4 «Нильменско-Причернореченская» разделяется на три урочища (Рисунок 74) (Терёхина и др., 2024).

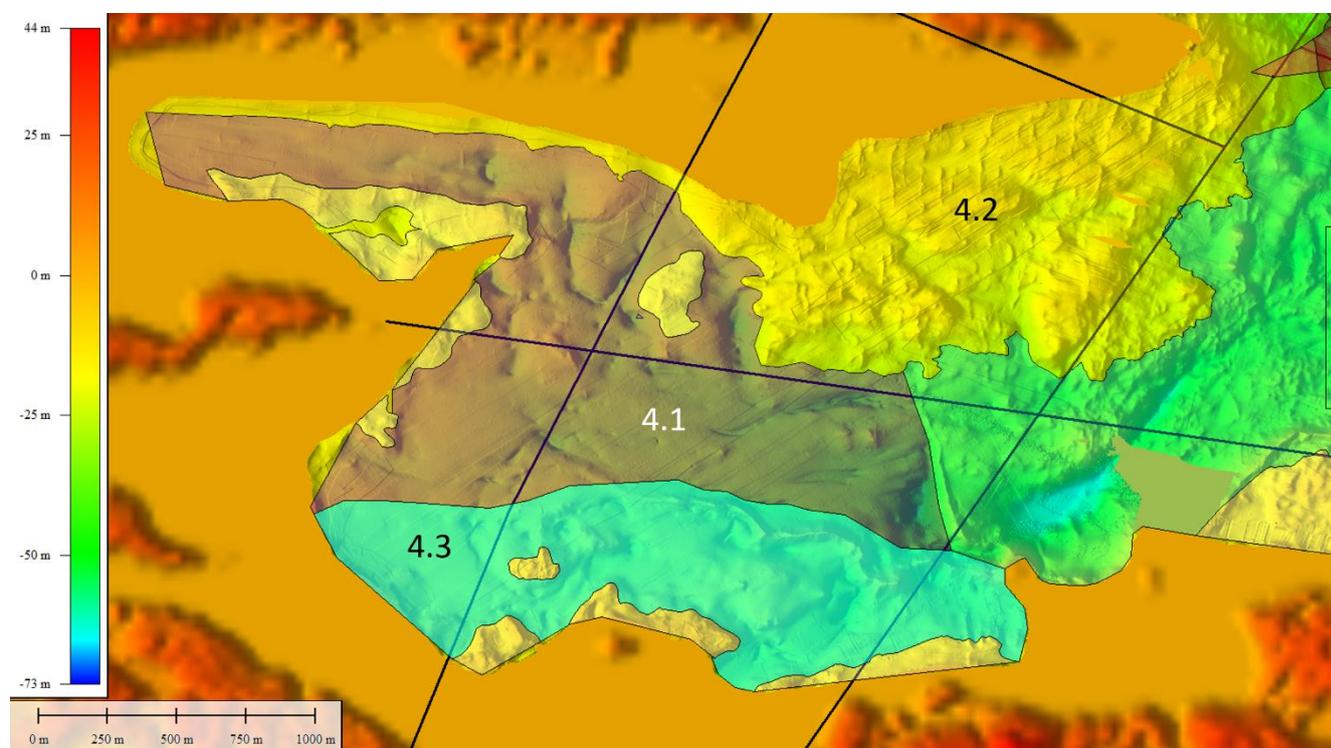


Рисунок 74. Урочища «Нильменско-Причернореченской» местности.

Урочище 4.1 полого-наклонная равнина с глубинами от 15 до 40 м, осложненная несколькими структурно-предопределенными ложбинами (фация 2). Мезорельеф сглажен, так как моренные отложения перекрыты комплексом ледниково-морских и морских осадков.

Урочище 4.2 это прибрежная полого-наклонная равнина с глубинами до 30 м. Зона приурочена к воздымающемуся выступу фундамента. На кристаллическом фундаменте залегают моренные отложения мощностью до 20 м (фация 12). «Мягкие» осадки отсутствуют.

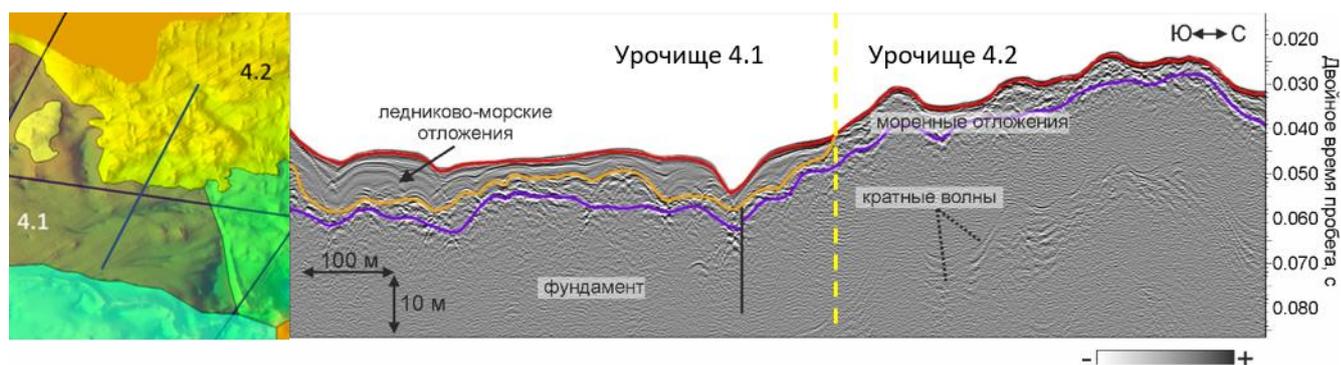


Рисунок 75. Фрагмент сейсмического разреза через урочища 4.1 и 4.2 (справа), положение профиля (слева)

Урочище 4.3 полого-наклонная равнина с глубинами от 10 до 30 м. Наблюдается флювиогляциальная гряда субширотного простирания. Моренные отложения перекрыты только тонким слоем осадков, что формирует характерный холмисто-западинный мезорельеф (фации 2, 5 и 23).

Таким образом, качественный и количественный геостатистический анализ гидроакустических данных позволили выделить 15 районов ранга урочищ в пределах выделенных местностей, границы которых следует воспринимать как пограничные зоны с постепенно изменяющимися свойствами (Рисунок 76).

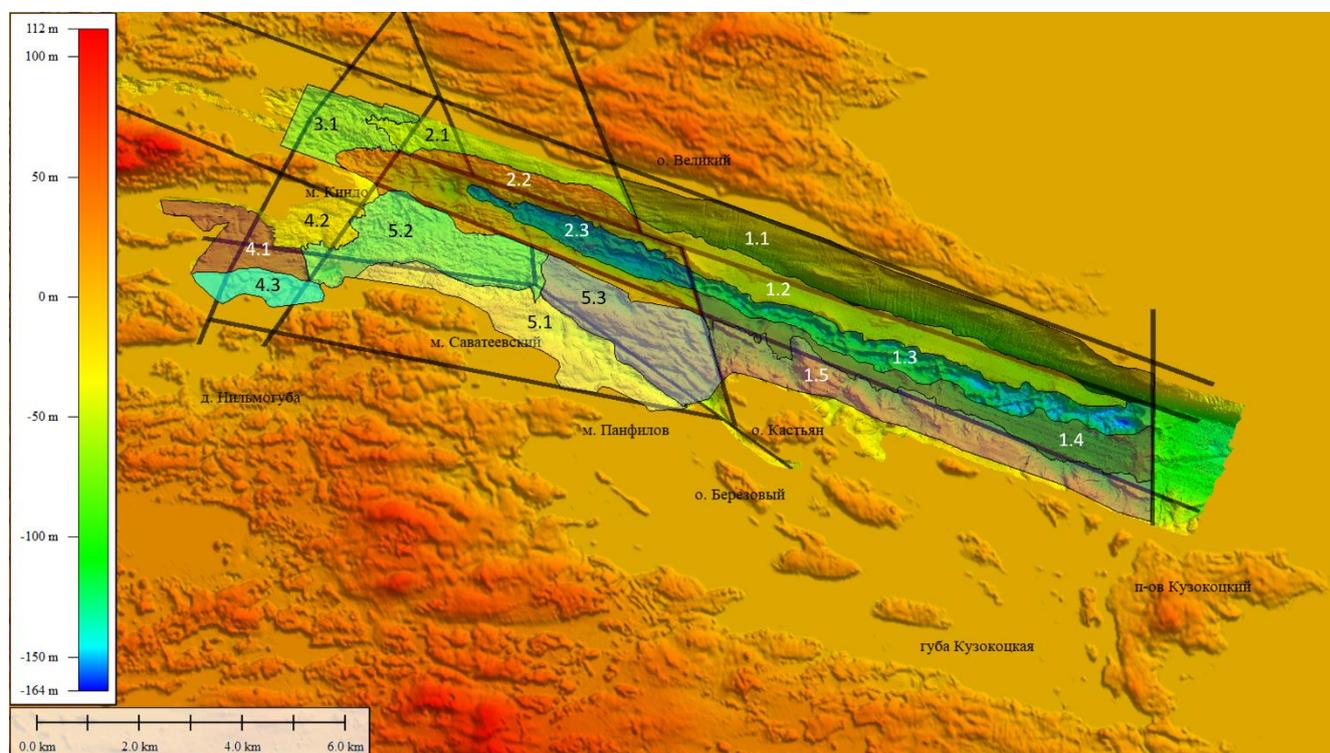


Рисунок 76. Карта урочищ пролива Великая Салма

## 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: первый с преобладанием дистанционных геофизических наблюдений, второй на основе оптических аппаратных и/или водолазных обследований и третий объединяющий оба подхода, как на этапе полевых исследований, так и при комплексировании результатов. Использование дистанционных и оптических методов в одном исследовании позволяет определять ландшафтные выделы масштабных уровней местностей, урочищ и фаций. 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. Основные геологические особенности района определены морфологией кристаллического фундамента, строением и составом ледниковых, ледниково-морских и морских отложений. Современный рельеф участка исследований имеет структурно-тектоническую предопределенность. В четвертичное время характер донной поверхности неоднократно изменялся в ледниковые периоды. Настоящий вид морского дна сформирован современными процессами денудации, транзита и аккумуляции. В следствие чего распространение ландшафтных выделов мозаично. Таким образом, на небольшом по площади участке возможно отработать методику картирования донных ландшафтов, характерных для гляциальных шельфов разных типов.
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. Для получения представительных данных предлагается использовать программно-аппаратный гидроакустический комплекс, позволяющий проводить исследования в различных диапазонах частот. В работе определена методика съемки НСП, ГЛБО и МЛЭ с указанием параметров разрешающей способности исследований в плане и глубине, отвечающая задачам исследования геологического строения верхней части разреза и изучению геоморфологических особенностей макро-, мезо и микрорельефа. Разработанные алгоритмы анализа гидроакустических данных были реализованы в программном обеспечении САМГИ, позволяющем проводить статистическую оценку распределения атрибутов акустического сигнала в пределах площадок единичных измерений в соответствии с масштабом прямых наблюдений (пробоотбора, фото- и видеосъемки) для последующей комплексной интерпретации и верификации результатов количественного анализа прямыми методами. Разработанная автором технология, включая методику количественной интерпретации, расширяет возможности применения геостатистических методов для анализа многопараметровой информации по комплексу гидроакустических методов для картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов.

4. Для верификации технологии картирования и изучения донных ландшафтов гляциальных шельфов был определен тестовый полигон «Пролив Великая Салма» в окрестностях Беломорской биологической станции МГУ им. М.В. Ломоносова (ББС МГУ), где, в рамках научно-образовательной морской практики Геологического факультета МГУ, были проведены геолого-геофизические наблюдения. Они включали сейсмоакустическое профилирование, гидролокацию бокового обзора и многолучевое эхолотирование, геологический пробоотбор, подводные аппаратные и водолазные наблюдения.

На базовых этапах полевых исследований в 2016 и 2021 годах, под руководством и участия автора, были спроектированы и проведены работы в следующих объемах:

- Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (453 п. км);
- Батиметрическая съемка (63 кв. км);
- Гидролокация бокового обзора (трехчастотный вариант) (296 п. км / 831 п. км / 125 п. км);
- Геологический пробоотбор (90 точек);
- Подводная фото- и видеосъемка (76 точек)

В результате полевых наблюдений на тестовом полигоне пролива 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. Апробация авторской технологии, в части комплексной интерпретации разнородных данных, для картирования геолого-геоморфологических компонентов подводных ландшафтов включала в себя:

- Изучение геологического строения по данным мультимастотных сейсмоакустических наблюдений;
- Анализ батиметрических данных для выделения геоморфологических элементов мезо- и микрорельефа;
- Качественная и количественная геостатистическая интерпретация данных акустического профилирования и гидролокации бокового обзора в трех частотных диапазонах для определения типов донных осадков и изучения литодинамических процессов;
- Комплексование результатов гидрологических исследований, подводных фото- и видеонаблюдений, пробоотбора и лабораторных испытаний с данными дистанционных наблюдений для идентификации и районирования абиотических компонентов подводных ландшафтов

6. 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 северо-западного направления, формирующими грабен пролива, и оперяющими нарушениями северо-северо-западного простирания.

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.

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 по заказу НК «Роснефть».

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.

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 сокращений

EAGE - European Association of Geoscientists and Engineers

GPS - Global Positioning System

SBP – sub bottom profiler

SPE - Society of Petroleum Engineers

WWF - World Wildlife Fund

АНПА - автономные необитаемые подводные аппараты

АНПА – автономные необитаемые подводные аппараты

ББС МГУ – Беломорская биологическая станция им. Н.А.Перцова биологического факультета

Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

БРЭ - Большая российская энциклопедия

ВАК - Высшая аттестационная комиссия

ВМФ - военно-морской флот

ВНИРО - Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии

ВЧ НСП – высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование

ГИН РАН - Геологический институт Российской академии наук

ГИС – Геоинформационные системы

ГЛБО – гидролокация бокового обзора

ГЛОНАСС - Глобальная навигационная спутниковая система

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ЕАГО - Евро-Азиатское геофизическое общество

ЗАО - Закрытое Акционерные Общество

ИО РАН - Институт океанологии Российской академии наук

ЛГД - Лаборатория гидролокации дна

МАГЭ - Морская арктическая геологоразведочная экспедиция

МГК - метод главных компонент

МДЗ – материалов дистанционного зондирования

МЛЭ – многолучевое эхолотирование

МОВ – метод отраженных волн

НЧ НСП - низкочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование

ОГТ – общая глубинная точка

ООПА – особо охраняемые природные акватории

ООПТ – Особо охраняемые природные территории

ПО – программное обеспечение

РИНЦ – Российский индекс научного цитирования

РФ - Российская Федерация

РФ – Российская Федерация

САМГГИ – Система анализа морской геолого-геофизической информации

СП – свод правил

ССВР – сейсморазведка сверхвысокого разрешения

СССР – Союз Советских Социалистических Республик

СУВР – сейсморазведка ультравысокого разрешения

США – Соединённые Штаты Америки

ТИГ ДВО РАН – Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук

ТНПА – телеуправляемые необитаемые подводные аппараты

ФГУП «ВСЕГЕИ» - Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А. П. Карпинского

ЦАСД МГУ – Центр анализа сейсмических данных Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова

ЦМИ МГУ – Центр морских исследований Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова

ЦМР – цифровая модель рельефа

## Список иллюстраций

Рисунок 1. Карта Арктической зоны Российской Федерации (светло синяя область). Пунктиром нанесен Северный морской путь. Звездочкой обозначен район исследования диссертационной работы (по материалам сайта <a href="https://admnoyabrsk.ru/">https://admnoyabrsk.ru/</a> ) .....	4
Рисунок 2. Иллюстрация процесса съемки многолучевым эхолотом ( <a href="https://www.marinha.mil.br/emgepron/en-us/node/223">https://www.marinha.mil.br/emgepron/en-us/node/223</a> ).....	18
Рисунок 3. Три базовые стратегии картирования подводных ландшафтов (по Ferrier et al., 2006, Brown et al., 2012).....	24
Рисунок 4. Общая схема комплексного подхода к сбору полевых данных для целей проекта ТОПКОНС, разработанного и опробованного в 2012-2014 гг. (Орлова и др., 2014).....	29
Рисунок 5. Пример мозаики ГЛБО контрастных объектов (устричные банки в заливе Петра Великого, Японское море).....	30
Рисунок 6. Ландшафтные выделы, иллюстрированные подводными фотографиями (Мокиевский и др., 2012б). .....	32
Рисунок 7. Схема размещения фаций осадконакопления на площади Белого моря (Невесский и др, 1977). 1- фация пляжей; 2 – прибрежная фация; 3 – фация дельт и предустьевых районов; 4 – фация заливов; 5 – фация обширных морских мелководий; 6 – фация склонов впадины моря; 7 – фация срединной части моря; 8 – бенч; 9 – границы фациальных зон. ....	34
Рисунок 8. Обобщенный сейсмостратиграфический разрез полигона «Глубоководный» в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря (Кубышкина и др., 2012).....	39
Рисунок 9. Структурно-предопределенный рельеф гряды, отражающей границу приподнятого тектонического блока, модифицированному многочисленными разрывами голоценового возраста и инъецированными ими гравитационными процессами (Кандалакшский залив, работы 2022 года).....	44
Рисунок 10. Акустическое изображение валуна на дне при съемке гидролокаторами Klein 3900 и СЗД на различных частотах и в различных направлениях .....	48
Рисунок 11. Зависимость пространственной разрешающей способности от удаления объектов 50	
Рисунок 12. Пример объемного рассеяния. На примере низкочастотного гидролокационного изображения (А) в оранжевом овале видны области интенсивного рассеяния. На примере среднечастотного гидролокационного изображения в тех же координатах (Б) в оранжевом овале отсутствуют области интенсивного рассеяния. Этот эффект наблюдается за счет изменения	

частоты съемки, наличия малой толщины первого слоя и контраста в свойствах нижележащих отложений. ....	51
Рисунок 13. Области с наибольшей величиной обратного рассеяния соответствуют наклонным поверхностям в рельефе дна: склонам ложбин или гряд. ....	53
Рисунок 14. В центральной части сонограммы наблюдается положительный рельеф с повышенными значениями интенсивности обратного рассеяния (темные оттенки). Это выход фундамента на поверхность с грубообломочными включениями. В окрестности этого холма интенсивности обратного рассеяния падает до средних и низких значений (серые и светло-серые оттенки), что соответствует литологической смене (Старовойтов и др., 2018а).....	55
Рисунок 15. Пример положения центров окон расчёта при угле 45 градусов, размере окна 15x15 м, шаге по профилю 10 м. Цветная шкала соответствует атрибуту «Средняя квадратичная амплитуда» (у.е.) (Терёхина и др., 2021) .....	57
Рисунок 16. Иллюстрация, поясняющая смысл атрибутов медиана, мода, среднее арифметическое и асимметрия. ....	58
Рисунок 17. Морская карта. Кандалакшский залив Белого моря (Морская карта..., 1987). Синие овалы отмечают губы второго порядка центральной части Кандалакшского залива.....	63
Рисунок 18. Пролив Великая Салма на увеличенном фрагменте морской карты. Кандалакшский залив Белого моря (Морская карта..., 1987).....	64
Рисунок 19. Карта фактического материала.....	66
Рисунок 20. Фрагмент полевых данных НСП .....	67
Рисунок 21. Фрагмент изображения цифровой модели рельефа дна способом аналитической отмывки.....	68
Рисунок 22. Мозаики низкочастотного и среднечастотного ГЛБО .....	69
Рисунок 23. Карта атрибута $AgMean$ , рассчитанного по данным гидролокатора бокового обзора С3D 200 кГц (Цветом показано значение атрибута).....	70
Рисунок 24. Измерение температуры и фотодокументация керна.....	71
Рисунок 25. Фотографии дна, сделанные ТНПА РБ «Мираж». А - станция 1-4 (илистый грунт), В – станция 1-3 (песчаный грунт), С – станция 1b-1 (каменистый грунт).....	71
Рисунок 26. Гистограмма распределения интенсивности обратного рассеяния в окне 50x50 м на данных гидролокатора С3D (200 кГц). Участок выхода коренных пород. Профили поперечного (снизу) и продольного (сверху) направлений.....	72
Рисунок 27. Гистограмма распределения интенсивности обратного рассеяния в окне 50x50 м на данных гидролокатора Klein (445 кГц). Участок выхода коренных пород. Профили поперечного (слева) и продольного (справа) направлений. ....	73

Рисунок 28. Сейсмический разрез по профилю 2004_p_223 в юго-западной части полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля. ....	75
Рисунок 29. Сейсмический разрез по профилю 2004_p_329 в северо-западной части полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля. ....	75
Рисунок 30. Сейсмический разрез по профилю 2016_line0126 полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля. ....	76
Рисунок 31. Сейсмический разрез по профилю 2012_002 полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля. ....	76
Рисунок 32. Сейсмический разрез по профилю 2008_V011 полигона с элементами интерпретации. На карте-врезке показано положение профиля. ....	77
Рисунок 33. Карта кровли кристаллического фундамента с основными разломами. Шкала справа в метрах .....	78
Рисунок 34. Карта мощности моренных отложений .....	79
Рисунок 35. Карта мощности постледниковых отложений .....	80
Рисунок 36. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участок типа 1, граничащего с типом 3. Наблюдается мощный комплекс морских отложений. ....	85
Рисунок 37. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участок типа 2, граничащего с типом 3. Маломощные морские отложения залегают на ледниковом субстрате, кровля морены на некоторых участках выходит на поверхность дна. ....	86
Рисунок 38. Пример сейсмоакустического разреза через участки типа 3 (архивные данные). Наблюдаются выходы ледниковых отложений на поверхность дна в виде гряд или равнинных областей, местами перекрытых маломощными морскими отложениями (участки типа 2). ....	87
Рисунок 39. Пример сейсмоакустического разреза через участок типа 4 (архивные данные). Выделяются горстообразные поднятия фундамента, на котором местами залегают маломощная морена. ....	88
Рисунок 40. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участки типов 5 и 6. Наблюдаются оползневые тела в нижней части северного склона. ....	88
Рисунок 41. Пример разреза, полученного съёмкой профилографа, через участок типа 7. Наблюдаются ложбины в маломощных морских отложениях. ....	89
Рисунок 42. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным .....	90
Рисунок 43. Результат разбиение на 30 кластеров по данным среднечастотного ГЛБО поперечного направления. Каждый кластер показан своим цветом. ....	91
Рисунок 44. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 23 (красные точки) и кластер 10 (зеленые точки) ....	91

Рисунок 45. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 4 (зеленые точки), кластер 6 (красные точки) и кластер 29 (желтые точки).....	92
Рисунок 46. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 1 (зеленые точки), кластер 3 (красные точки) и кластер 12 (желтые точки).....	92
Рисунок 47. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 18 (зеленые точки), кластер 19 (красные точки), кластер 20 (желтые точки) и кластер 27 (белые точки).....	93
Рисунок 48. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Слева: кластер 14 (красные точки), кластер 16 (желтые точки) и кластер 28 (черные точки). Справа: кластер 8 (зеленые точки), кластер 24 (белые точки) и кластер 25 (коричневые точки).....	93
Рисунок 49. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 2 (зеленые точки).....	94
Рисунок 50. Карта однородных областей, построенная по гидроакустическим данным, с нанесенными точками кластеров. Кластер 5 (зеленые точки), кластер 11 (красные точки), кластер 17 (желтые точки) и кластер 22 (белые точки).....	94
Рисунок 51. Сравнение разночастотных данных на одном участке. Жёлтым пунктиром показаны прослеживаемые области тонкозернистых осадков. Синими стрелками указаны некоторые отдельные объекты, размером 1-2 м (Старовойтов и др., 2018а).....	95
Рисунок 52. Сравнение разночастотных данных на одном участке. Увеличение частоты позволяет уточнить размерность донных осадков, но снижает прослеживаемость однородных зон (Старовойтов и др., 2018а). .....	96
Рисунок 53. Карта донных осадков .....	97
Рисунок 54. Карта основных элементов макрорельефа. Шкала отвечает высотам и глубинам в метрах, пронумерованные цветные области – выделенным макроэлементам.....	102
Рисунок 55. Карта ландшафтных выделов, соответствующих масштабному уровню местностей. Цветовая шкала показывает высоты и глубины. Пронумерованные цветные зоны соответствуют ландшафтным выделам ранга местностей (описание дано в тексте). Черным показаны области основных разрывных нарушений. ....	103
Рисунок 56. Фрагменты профилей ССВР с интерпретацией через северный склон грабена Великой Салмы (1 и 2). Фрагмент ЦМР с положением показанных профилей (слева). .....	104

Рисунок 57. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через восточную часть грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля(слева). .....	104
Рисунок 58. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через северный склон центральной части грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля(слева). .....	105
Рисунок 59. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через тальвег центральной части грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля(слева). .....	105
Рисунок 60. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через западную часть грабена Великой Салмы (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля(слева). .....	106
Рисунок 61. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через Нильменско-Причернореченскую местность (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля(слева). .....	106
Рисунок 62. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через северо-западную часть Панфилово-Саватеевской равнины(справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева). .	107
Рисунок 63. Фрагмент профиля ССВР с интерпретацией через юго-восточную часть Панфилово-Саватеевской равнины (справа). Фрагмент ЦМР с положением профиля (слева). .....	107
Рисунок 64. Фация 1 грядовая равнина.....	110
Рисунок 65. Фация 2 – ложбина.....	110
Рисунок 66. Фация 2 - транзитно-аккумулятивная флювиальная равнина .....	111
Рисунок 67. Фация 5 - аккумулятивно-денудационная холмистая равнина .....	112
Рисунок 68. Пример фации 23 – промоина.....	115
Рисунок 69. Карта урочищ Панфилово-Саватеевской местности.....	116
Рисунок 70. Профили рельефа через урочище Южный прибрежный склон (слева). Справа на карте положения разрезов. ....	117
Рисунок 71. Пример выделения форм мезорельефа на батиметрической карте: линии – морены Де Гира, овалы – структурно-предопределенные ложнины. (А) - без интерпретации. (Б) – с интерпретацией. Цветовая шкала показывает глубины. ....	117
Рисунок 72. Профиль рельефа через восточную часть пролива (вверху), положение профиля на карте рельефа (внизу) .....	118
Рисунок 73. Профиль рельефа через местность «Центральная часть грабена Великой Салмы» .....	119
Рисунок 74. Урочища «Нильменско-Причернореченской» местности. ....	120
Рисунок 75. Фрагмент сейсмического разреза через урочища 4.1 и 4.2 (справа), положение профиля (слева) .....	121
Рисунок 76. Карта урочищ пролива Великая Салма.....	121

**Список таблиц**

Таблица 1. Сравнение дистанционных и прямых методов в исследовании донных ландшафтов (Мокиевский и др., 2015).....	16
Таблица 2. Морфометрические характеристики рельефа шельфа (Никифоров, 2006).....	19
Таблица 3. Масштабные уровни ландшафтов (СП502.1325800.2021, 2021).....	22
Таблица 4. Техническая характеристика оборудования для осуществления гидролокационной съемки.....	47
Таблица 5. Гранулометрический состав осадков, создающих вклад в эффекты объемного и поверхностного рассеивания акустической энергии .....	51
Таблица 6. Требования к составу и параметрам программно-аппаратного комплекса .....	53
Таблица 7. Параметры регистрации для ГЛБО Teledyne Benthos C3D+SBP .....	69
Таблица 8. Параметры регистрации для ГЛБО Klein 3900 .....	69
Таблица 9. Типы элементов мезорельефа и их генезис .....	82
Таблица 10. Краткое описание выделенных типов однородностей на данных гидролокации бокового обзора с примером акустического изображения. ....	84
Таблица 11. Примеры склоновых фаций .....	114

### Список литературы

1. Авенариус И.Г., Виталь А.Д., Фроль В.В. Новейшие тектонические движения в районе пролива Великая Салма (Белое море) в поздне- и послеледниковое время // Теория и практика компл. морских исслед. в интересах экономики и безопасности российского Севера. Мурманск: 2005. С. 9–11.
2. Алявдин Ф.А., Мануйлов С.Ф., Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Спиридонова Е.А., Эйхгорн Г.Л. Новые данные по геологии северо-западной части Белого моря // Природа и хозяйство Севера. 1977. Вып. 6. С. 30–38.
3. Аксенов А. О., Пирогова А. С., Рыбалко А. Е., Токарев М. Ю., Потемка А. К., Дудков И. Ю., Бирюк М. А. Признаки сартанского оледенения южной части Северо-Карского шельфа по данным геофизических исследований в рейсе ТТР-21 // Геофизика. 2023. №2. с. 21–28.
4. 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.
5. Арзамасцев И.С., Преображенский Б.В. Атлас подводных ландшафтов Японского моря. М.: Наука, 1990. 224 с.
6. Арзамасцев И.С., Жариков В.В., Лебедев А.М., Преображенский Б.В. Подводное ландшафтное картографирование района выносных причальных сооружений нефтепорта Козьмино (залив Находка, Приморский край) как основа для мониторинга последствий строительства / Защита окруж. среды в нефтегаз. комплексе. 2012. № 1. С. 23-29.
7. Ассиновская Б.А. Сейсмичность Баренцева моря. М. – Наука, 1994. 128 с.
8. Балувев А.С., Васильева Т.И., Глуховский М.З., Моралев В.М., Пржиялговский Е.С., Терехов Е.Н. Геодинамическая эволюция палеорифтовых систем Белого и Баренцева морей // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Т 1. Тектоника, стратиграфия, литология. Мат. Всеросс. Науч. Конф. М.: ООО «Связь-принт», 2002. С. 23-25.
9. Балувев, А. С., Пржиялговский Е. С., Терехов Е. Н. Новые данные по тектонике Онежско-Кандалакшского палеорифта (Белое море) // Доклады Академии наук. – 2009. – Т. 425, № 2. – С. 199-203

10. Балугев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н., Пржиялговский Е.С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий // Отв. Ред. М.Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2012. – 104 с.
11. Блинова Е.И., Вилкова О.Ю.; Милютин Д.М., Пронина О.А.; Штрик В.А. Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Выпуск 3. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны. – М.: Изд-во ВНИРО, 2005. – 135 с.
12. Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов; 2004—2017
13. Варейчук Н. С., Игнатов Е. И. Геоморфологическая карта дна Белого моря // Геоморфология. — 1989. — № 1. — С. 67–72
14. Выполнение работ по разработке программных средств и методических рекомендаций для картографирования биотопов в условиях мелководных заливов Арктических морей: отчет о НИР/Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Козловский В.В. и др. – Москва: Центр морских исследований МГУ, 2017. – с. 291
15. Гершанович Д.Е., Федоров В.В. Морское ландшафтоведение новый подход к изучению природы океана // Изв. АН СССР: Сер. геогр. 1985. №5. С. 50-55.
16. Глушанкова Н.И., Воскресенская Т.Н., Соболев В.М. Геоэкологические обстановки и особенности осадконакопления в поздне и послеледниковой истории горла Белого моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. №7.
17. Горный В. И., Тронин А. А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях/ Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. С. 116-132.
18. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2015. 15 с.
19. ГОСТ Р 58743-2019. Внутренний водный транспорт. Гидрографические работы. Общие требования, 2020
20. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист Q-(35)-37 – Кировск. Объяснительная записка / К.Я. Якобсон, Ю.Б. Богданов и др. – СПб.: Карт.ф-ка ВСЕГЕИ, 2004. – 268 с.

21. Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение). Балтийская серия. Геологическая карта четвертичных образований. Q-(35), 36 (Апатиты). ВСЕГЕИ, 2012.
22. Гуков А. Ю. Экология донных биоценозов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. Диссер. ... докт. биол. наук. Якутск, 2013. 352 с.
23. Гуков А. Ю. Донные ландшафты в районе нового острова в море Лаптевых / Основные проблемы естественных и математических наук / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 2. г. Волгоград, 2015. С. 85-87.
24. Гурьева З.И., Петров К.М., Шарков В.В. Аэрофотометоды геолого-геоморфологического исследования внутреннего шельфа и берегов морей. Атлас аннотированных аэрофотоснимков. Недра, Ленинград, 1976 г., 227 стр.
25. Девдариани Н.А. Геологическое строение Беломорской впадины: автореф. Дисс. Канд. Геол.-минерал. Наук. М., 1985. 24 с.
26. Дорохов Д.В. Ландшафтно-экологическое районирование субаквальных комплексов юго-восточной части Балтийского моря. Дис. ... канд. геогр. наук. К., 2018. 174 с.
27. Дорохова Е.В., Дорохов Д.В. Геолого-геофизические исследования морских донных ландшафтов юго-восточной части Балтийского моря/ Труды IV Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)», 19-24 октября 2015 г., Москва, Ломоносовский корпус МГУ. Москва : Феория, 2015. С. 80-81.
28. Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Применение современных методов аэро- и подводной видеосъемки в изучении литоральных биотопов Ладожского озера /Conference: III Международная научно-практическая конференция «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» (Россия, г. Новосибирск, 15-16.08.2014)
29. Жариков В. В. Ландшафтно-географический аспект проблемы определения границ крупных морских экосистем/Вестник Морского государственного университета. Вып. 28/2008. Серия: Теория и практика защиты моря. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2008. С. 44-50.
30. Жариков В. В., Преображенский Б. В., Лебедев А. М. Геоэкологическое состояние полигона дампинга грунта у острова Лисий (залив Находка)/ Вестник ДВО РАН. 2011. № 2. С. 88-97.

31. Жариков В.В., Базаров К.Ю., Егидарев Е.Г. и др. Картографирование подводных ландшафтов Дальневосточного морского заповедника (Залив Петра Великого, Японское море) с использованием данных дистанционного зондирования/ Материалы XV совещания географов Сибири и Дальнего Востока (г. Улан-Удэ, 10-13 сентября 2015 г.). Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. С.500-503.
32. Зенкович В.П. Промысловые карты губ Княжой, Вороньей и Белой. Тр. Всесоюзного НИИ МРХиО, Т.V, М, 1938, с 131-162.
33. Илюшин Д. Г., Исаченко А. И., Шабалин Н. В., Мокиевский В. О. Современные методы исследования донных сообществ/Инженерные изыскания. 2014. № 9-10. С. 98-104.
34. Ионин А.С., Каплин Н А ., Медведев В.С. Подводные исследования прибрежных осадков шхерного района. - В кн.: Развитие морских подводных исследований. М., "Наука", 1965.
35. Исаченко А. И. Структура поселения морского двустворчатого моллюска *Arctica islandica* (Linnaeus, 1767) в пространстве и времени. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2013. 21 с.
36. Исхаков А.А., Хохлов А.В., Переладов М.В., Исхаков О.А. Картирование донных отложений акваторий Северо-Курильских островов/ Труды IV Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование: MARESEDU-2015». Москва, Ломоносовский корпус МГУ 19-24 октября 2015 г.
37. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 1983. 204 с.
38. Каплин П.А. Фиордовые побережья Советского Союза. М., 1962, 188 с.
39. Колюбакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Рыбалко А.Е., Терёхина Я.Е., Токарев М.Ю. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. 2016. № 10-11. С. 38–52.
40. Комплексные исследования подводных ландшафтов в Белом море с применением дистанционных методов // Труды Беломорской биостанции МГУ. М.: КМК, 2012. 173 с.
41. Кондратьева Е.Н. Применение космической съемки в исследовании динамики разных территорий Земли/ Женщины и вызовы современности: сборник статей научно-практической конференции с международным участием, 2013 г, г. Якутск, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова [Электронный ресурс]. С. 138-142.

42. Косевич Н.И. Морфология и динамика рельефа островов Кандалакшского залива Белого моря. Автореф. дис. ... канд. геог. наук. М., 2016. 23 с.
43. Кошечкин Б.И. Голоценовая тектоника восточной части Балтийского щита. Л.: «Наука», 1979. 158 с.
44. Крашенинников Г.Ф., Учение о фациях. 1971, изд-во: Высшая школа., город: М., стр. : 368 с.
45. Кубышкина А.И., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. Строение осадочного чехла на модельном полигоне «Глубоководный» по данным сейсмоакустического профилирования. // Труды Беломорской биостанции МГУ. т. 11. М.: Товар-во науч. изданий КМК, 2012. С. 34–40.
46. Лабутина И.А., Балдина Е.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие / Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона» М., 2011. 88 с.
47. Лисицын А. П., Немировская И. А., Шевченко В. П., Рыбалко А. Е., Никифоров С. Л., Величко А. А., Колька В. В., Субетто Д. А., Леин А. Ю., Полякова Е. И., Новичкова Е. А., Ключиткина Т. С., и др., Система Белого моря. Том IV. 2017. Процессы осадкообразования, геология и история. Научный мир, Москва.
48. Маев Е.Г., Сафьянов Г.А., Фроль В.В., Зверев А.С. Мощность осадков и рельеф коренного ложа пролива Великая Салма (Белое море). // Геоморфология. №1. 2010. с.59-67.
49. Мануйлов В. А. Подводные ландшафты залива Петра Великого. Владивосток. Изд-во Дальневост. ун-та. 1990. 167 с.
50. Мануйлов С.Ф., Рыбалко А.Е., Спиридонова Е.А., Спиридонов М.А. Четвертичная геология северо-западной части Белого моря. - В сб.: Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода Севера европейской части СССР. Петрозаводск, Карельский филиал АН СССР, 1977, с. 47-55.
51. Мараханов А. В., Романенко Ф. А. Новые данные о послеледниковых сейсмодислокациях Северной Карелии (Карельский берег Белого моря) // Юдахинские чтения. Геодинамика и экология Баренц-региона в XXI в.: Материалы докл. Всероссийской конференции с международным участием. (15-18 сентября 2014 года). – Архангельск, 2014. Стр. 137-140.
52. Маркевич А.И., Суботэ А. Э. Зимин П. С., Фищенко В. К. Первый опыт использования системы долговременного подводного видеонаблюдения для

биологического мониторинга в заливе Петра Великого (Японское море)/Вестник ДВО РАН. 2015. № 1. С. 86-91.

53. Медведев В.С. Краткий очерк динамики и морфологии западного побережья Белого моря. "Тр. Океаногр комиссии АН СССР", 1957, т. 2, с.69-85.

54. Мироненко М.В., Карачун Л.Э., Василенко А.М., Пятакович В.А. Промышленное рыболовство на основе просветной гидролокации и средств морского приборостроения/Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана: Материалы 3-й Международной научно-технической конференции, Владивосток, 27-29 мая, 2014. Ч. 1. Пленарные доклады. Водные биоресурсы, экология, рыболовство и аквакультура. Морская инженерия. Владивосток. 2014. С. 283-288.

55. Митина Н. Н., Чуприна Е.В. Подводные ландшафты Черного и Азовского морей: структура, гидроэкология, охрана. М., ФГУП «Типография» Россельхозакадемии, 2012. 320 с.

56. Мокиевский В.О. Прямые и дистанционные методы изучения донных природных комплексов. Краткий обзор методов, технических средств и методик изучения прибрежной зоны морей. М., 2006.

57. Мокиевский В.О. Экология морского мейобентоса. М., КМК. 2009. 286 с.

58. Мокиевский В.О. Экология морского мейобентоса: количественное распределение, таксономическое разнообразие и организация сообществ: диссертация ... докт. биол. наук. Москва, 2012. 244 с.

59. Мокиевский В.О., Исаченко А.Ю., Макаров А.В. Методические рекомендации по использованию дистанционной инструментальной информации и механизмам сотрудничества МП ООПТ с организациями, осуществляющими прием и обработку спутниковой информации/. М., 2012а.

60. Мокиевский В.О., Спиридонов В.А., Токарев М.Ю., Добрынин Д.В. Современные дистанционные методы в изучении морских донных сообществ и ландшафтов прибрежной зоны // Труды ББС МГУ. Комплексные исследования подводных ландшафтов в Белом море с применением дистанционных методов. М.: КМК, 2012б. С. 6–21.

61. Мокиевский В. О., Исаченко А. И., А.В. Макаров А. В. Применение дистанционных методов в изучении донных сообществ/ Комплексные экологические исследования шельфовой зоны. Сборник учебно-методических пособий. М., ББС имени Н.А. Перцова. 2015. 267 с.

62. Мокиевский В.О., Спиридонов В.А., Токарев М.Ю., Добрынин Д.В. Современные дистанционные методы в изучении морских донных сообществ. В сб.: Комплексные исследования ландшафтов Белого моря//Труды ББС МГУ. Т. 10. 2011. 230 с.
63. Морская карта. Кандалакшский залив Белого моря. Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны СССР. 1987
64. Мосолов С.С., Скняря А.В. Гидролокатор бокового обзора с фазовой обработкой сигнала/ Известия ЮФУ. Технические науки Тематический выпуск. №9 (122). 2011. С. 78–82.
65. Наумов А. Д., Федяков В. В. Вечно живое Белое море // Издательство: Санкт-Петербургского городского дворца творчества юных, Санкт-Петербург, 1993
66. Невеский Е. Н. Процессы осадкообразования в прибрежной зоне моря / АН СССР. Ин-т океанологии. Москва. Наука. 1967. 255 с.
67. Невеский Е.Н., Медведев В.С. Осадконакопление в Кандалакшском заливе в позднепоследлениковское время. - В кн.: Процессы развития и методы исследования прибрежной зоны моря. М. Наука. 1973. С. 54-75.
68. Невеский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море - седиментогенез и история развития в голоцене. М: Наука, 1977. 240 с.
69. Неевин И. А., Буданов Л. М., Сергеев А. Ю. и др. Геолого-геофизические методы как источник базовой информации для последующих биологических исследований и картирования подводных ландшафтов/ Региональная экология, №4 (39). 2015. С. 5-24
70. Никифоров С.Л. Рельеф шельфа морей Российской Арктики. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Москва, 2006
71. Никифоров С. Л., С.М. Кошель С. М., В.В. Фроль В. В. Цифровая модель рельефа дна Белого моря/ Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 3. С. 86-92.
72. Николаева С.Б. Сейсмичность в позднеплейстоцен–голоценовых осадках Северо-Запада Кольского региона (северная часть Балтийского щита)// Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 7. С. 830–839.
73. Орлова М. И., Рябчук Д. В., Жамойда В. А., Неевин И.А., Сергеев А.Ю. Особенности пространственной изменчивости абиотических элементов подводных ландшафтов и поселений донных макробеспозвоночных северной береговой зоны восточной части Финского залива/ Региональная экология, № 1–2 (35), 2014. С. 29-38.
74. Панкеева Т. В., Миронюк О. А., Панкеева А. Ю. Исследования донных ландшафтов прибрежной зоны Тарханкутского полуострова (Крым, Черное море) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, № 1. С. 800–805.

75. Пантюлин А.Н. Структура и динамика водного тела Белого моря. Динамика, структура и водные массы // Система Белого моря. Том 2. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М. Научный мир. 2012. С.309-379.
76. Пенно М. В. Развитие научных представлений о морских ландшафтах/Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Том 10. Выпуск 1. С. 166-172.
77. Переладова М. В., Сидоров Л. К., Ботнев Д. А. и др. Комплексные исследования прибрежных акваторий Северных Курильских островов в августе-сентябре 2015 г./Труды ВНИРО. Том 158. 2015. С. 190-193.
78. Петухов В.И., Минаев Д.Д., Лисицкая И.Г. Комплексные исследования экологического состояния морских акваторий/ Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12). С.69-74.
79. Преображенский Б.В., Жариков В.В., Дубейковский Л.В. Основы подводного ландшафтоведения (Управление морскими экосистемами). Владивосток: Дальнаука, 2000. 351 с.
80. РД 51-01-11-85. Экологические исследования при инженерных изыскания на континентальном шельфе. Требования к методам и результатам. 1986. 14 с.
81. Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А. Рельеф побережий Бабьего моря и о. Великого: история развития и современные изменения // Комплексные исследования Бабьего моря, полу-изолированной беломорской лагуны: геология, гидрология, биота — изменения на фоне трансгрессии берегов (Труды Беломорской биостанции МГУ. Т. 12). / В.О. Мокиевский, А.И. Исаченко, П.Ю. Дгебуадзе, А.Б. Цетлин (ред.). Т-во научных изданий КМК. М., 2016. С. 177-210, 245-251.
82. 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.
83. Римский-Корсаков Н. А., Пронин А. А. О методологии исследования дна акваторий и подводных объектов гидролокационными методами. Ин-т океанол. РАН. М., 2010, 62 с. Деп. в ВИНТИ РАН 22.12.2010, № 718-В201.

84. Римский-Корсаков Н. А. Технология исследования дна акваторий и подводных объектов гидролокационными методами. Диссертация ...доктора техн. наук. М., 2011. 249 с.
85. Романенко Ф.А., Баранская А.В. Дифференцированные вертикальные движения и блоковая тектоника побережий Кандалакшского залива Белого моря // IV Междунар. науч-практ. конф. молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, – Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ», 2015.
86. Романенко Ф.А., Шилова О.С. Послеледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озёрно-болотных отложений полуостровов Киндо // Докл. Академии наук, М.: «Наука», 2012. Т. 442, № 4. С. 544-548.
87. Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р., Токарев М.Ю. Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного Беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене–голоцене // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. С. 16–84.
88. Рыбалко А.Е., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Журавлев В.А., Варламова А.А., Никитин М.А. Новые данные о геологическом строении четвертичного покрова Белого моря. // Мат-лы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН. 2009. С. 286-288.
89. Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Кропачев Ю.П. и др. Обработка и интерпретация материалов локации бокового обзора для определения вещественного состава поверхностных образований шельфа. Методические рекомендации. // Л: ВСЕГЕИ, 1989. 43 с.
90. Рыбалко А. Е., Щербаков В. А., Токарев М. Ю., Кудинов А. А., Беляев П. Ю., Репкина Т. Ю., Зарецкая Н. Е., Терёхина Я. Е., Иванова В. В., Сличенков В. И. Роль современных геодинамических процессов в формировании рельефа дна и побережья Белого моря // Геотектоника. №1. 2024. с. 71–87
91. Сафьянов Г. А., Соловьева Г. Д. Геоморфология дна и берегов Белого моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2005. № 3. С. 54–62.
92. Соболев В.М., Алешинская З.В., Полякова Е.И. Новые данные о палеогеографии Белого моря в позднем плейстоцене-голоцене // Корреляция палеогеографических событий: континент-шельф-океан. М.: Изд-во МГУ, 1995. С. 120-129.

93. Сорокин В.М., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования осадочного чехла пролива Великая Салма // Разведка и охрана недр. 2009. № 2. С. 47–52.
94. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. Госстрой.
95. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. 2012. 131 с.
96. СП 502.1325800.2021 Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
97. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. 2021. М.: Минстрой России. 168 с.
98. Спиридонов М.А., Девдариани Н.А., Калинин А.В. и др. Геология Белого моря // Сов. геология. 1980. № 4. С. 45–55.
99. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.** Атлас по интерпретации геофизических данных для морской практики на Белом море. Учебное пособие. // 2018а. КДУ «Университетская книга» Москва. ISBN 978-5-91304-810-3. 110 с. 6,88 п.л, авторский вклад 25%.
100. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., **Терёхина Я.Е.**, Козупица Н.А. 2018 Строение осадочного чехла Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустики // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология – 2018б – № 2 – с. 81-92. (0,75 п.л, авторский вклад 15%). Импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,298
101. 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.
102. Тарасов Г.А., Шлыков В.В. Распределение мощностей четвертичных отложений и основные черты довалдайской поверхности Бассейна Белого моря // Доклады Академии наук, Геология, том 411, № 2, 2006, с. 226-230.
103. **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.
104. Терёхина, Я. Е., Токарев М. Ю. Технология сбора и анализа геофизических данных для картографирования абиотических компонент подводных ландшафтов // Инженерная и

- рудная геофизика 2021: Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. – Москва: ООО "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 167
105. **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.
106. **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.
107. **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.
108. Токарев М.Ю., Мокиевский В.О., Цетлин А.Б., Спиридонов В.А., Сафонов М.В. Междисциплинарные съемки донных ландшафтов// Наука и промышленность. 2002. № 9. С. 9–12.
109. Токарев М.Ю. Разработка технологии многоканальных сейсмоакустических исследований с заглубленными системами на мелководных акваториях:/ Автореф. канд. дисс. М., 2016.
110. Токарев, М. Ю., Росляков, А. Г., Терёхина, Я. Е., Бирюков, Е. А., Колюбакин, А. А., Горбачев, С. В. Перспективные сейсмические технологии для инженерно-геологических изысканий на мелководном шельфе // Геофизика. 2021. Спецвыпуск. С. 3-11.
111. Шабалин Н. В., Исаченко А. И., Киселева Е. А., Илюшин Д. Г., Козловский В. В., Мокиевский В. О. Применение дистанционных методов для оценки состояния донных сообществ при инженерных изысканиях //Арктическое морское природопользование в XXI веке - современный баланс научных традиций и инноваций (к 80-летию ММБИ КНЦ РАН): Тезисы докладов Международной научной конференции, Мурманск, 1-3 апр., 2015. Мурманск. 2015. С. 249-250.
112. Шалаева Н.В., Старовойтов А.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях. Учебное пособие. М.: 2010, 256 с.
113. Шалаева Н. В., Старовойтов А. В., Токарев М. Ю. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях Учебное пособие. 2-е издание, исправленное и дополненное. — КДУ Москва, 2024. — 344 с.

114. Шварев С.В., Бондарь И.В., Романенко Ф.А. Луговой Н.Н. Голоценовые палеосейсмодеформации на островах Кузокоцкого архипелага (Кандалакшский залив Белого моря, восточная Фенноскандия) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 2. № 21. С. 9–43.
115. Шевченко Н.В. Особенности геоморфологического строения фиардовых берегов приливных морей на примере Кандалакшского залива Белого моря. Дис. ... кандидата географических наук. М., 1999. 162 с.
116. Шевченко Н.В., Кузнецов Д.Е., Еромолов А.А. Сеймотектонические проявления в рельефе берегов Белого моря // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2007. № 3. Стр. 44-49.
117. Шлыкова, В. В. Геологическое строение верхней части осадочного чехла Бассейна Белого моря : специальность 25.00.28 "Океанология" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук – Мурманск, 2007. – 26 с.
118. Чуприна Е.В. Геоэкологическое обоснование размещения особо охраняемых природных акваторий Черного и Азовского морей. Диссер. .... кандидата географических наук. М., 2010. 250 с.
119. Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A., Chuyko M., Glaciomorphological Map of the Russian Federation // Quaternary International 420. 2016., p.4-14.
120. Ball, D., Blake, S. and Plummer, A. Review of Marine Habitat Classification Systems. Parks Victoria Technical Series No. 26, 2006.50 p.
121. Belderson R.H., Kenyon N.H., Striede A.H. et al. Sonographs of the sea floor. A Picture Atlas // Amsterdam – London – New-York, 1972. P.186
122. Bird, E.C.F., 2008, Coastal Geomorphology: An Introduction, 2nd ed. John Wiley and Sons Ltd. West Sussex, England.
123. Blondel, P., The Handbook of Side-scan Sonar. Springer Verlag (2009).
124. Brown Craig J., Smith Stephen J., Lawton Peter, Anderson John T. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques/ Estuarine, Coastal and Shelf Science 92 (2011). P. 502-520.
125. Brown Craig J., Sameoto Jessica A., Smith Stephen J. Multiple methods, maps, and management applications: Purpose made seafloor maps in support of ocean management/Journal of Sea Research 72 (2012). P.1–13.
126. Connor, D.W., Allen, J.H., Golding, N., Howell, K.L., Lieberknecht, L.M., Northen, K.O., and Reker, J.B., The Marine Habitat Classification for Britain and Ireland Version 04.05,

- Joint Nature Conservation Committee (JNCC), Peterborough, 2004. (internet version) [www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification](http://www.jncc.gov.uk/MarineHabitatClassification)
127. Connor, D.W., Dalkin, M.J., Hill, T.O., Holt, R.H.F., & Sanderson, W.G.. Marine Nature Conservation Review: marine biotope classification for Britain and Ireland. Vol. 2. Sublittoral biotopes. Version 97.06. Joint Nature Conservation Committee Report, №. 230, 1997. 448 p.
128. Davies Jaime S., Howell Kerry L., Stewart Heather A. et al. Defining biological assemblages (biotopes) of conservation interest in the submarine canyons of the South West Approaches (offshore United Kingdom) for use in marine habitat mapping /Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2014. T. 104. P. 208-229.
129. Dreßler, M., Schult, M., Schubert, M., Buck, J. Basin elevation and salinity changes: late Holocene development of two freshwater lakes at the Karelian White Sea coast, northwest Russia as reflected in their sediments // *Hydrobiologia* 631, 2009. pp.247–266.
130. Ferrier, S., Guisan, A., 2006. Spatial modelling of biodiversity at the community level
131. Fish J.P., Carr A.H. Sound underwater images: a guide to the generation and interpretation of side-scan sonar data. Orleans, MA, USA:American Underwater Search and Surveys Ltd, Lower Cape Publishing Co, 1990. 189 p.
132. Galparsoro I, Borja A and Uyarra MC, 2014. Mapping ecosystem services provided by benthic habitats in the European North Atlantic Ocean. *Front. Mar. Sci.* 1:23
133. Gubanova, Y., Isachenko, A., Tzetlin, A., and Tokarev, M. Application of seismoacoustic methods for mapping and monitoring of benthic ecosystems in Arctic shelf. In SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition, Москва, Россия, 16 октября 2012 - 18 октября 2013 (Society of Petroleum Engineers, 2012), pp. 1–2.
134. 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.
135. Jackson, D.R. and Briggs K.B., “High frequency bottom backscattering: roughness versus sediment volume backscattering.” *J. Acous Soc. Am.* 92: 962-977. (1992).
136. Madden, C. J. and Dennis H. Grossman 2004. A Framework for a Coastal/Marine Ecological Classification Standard. NatureServe, Arlington, VA
137. Madden, C. J. et al. A national ecological classification for coastal/marinehabitats. NOAA Technical Report. in review. 2004. 63 pp.
138. MESH, 2008. MESH (Mapping European Seabed Habitats): review of standards and protocols for seabed habitat mapping.

139. Kolka, V.V., Evzerov, V.Ya., Meller, Ya.I., Korner, D.D., 2005. Postglacial Glacioeustatic Uplifts in the Northeastern Baltic Shield, in: *Novye dannye po geologii i poleznym iskopaemym Kol'skogo poluostrova (New Data on the Geology and Mineral Deposits of the Kola Peninsula)*. Kol. Nauchn. Tsentr RAN, Apatity, pp. 15–25.
140. Rende, S.F., Irving, A.D., Bacci, T. et al. Advances in micro-cartography: a two-dimensional photo mosaicing technique for seagrass monitoring/*Estuarine, Coastal and Shelf Science* (2015), doi: 10.1016/j.ecss.2015.10.029.
141. Siaulys A., Daunys D., Bucas M., Bacevicius E. Mapping an ecosystem service: A quantitative approach to derive fish feeding ground maps/ *Oceanologia*, 54 (3), 2012. pp. 491–505.
142. Tamsett D., McIlvenny J., Baxter J., Gois P. and Williamson B. On the Information Advantage of Sidescan Sonar Three-Frequency Colour over Greyscale Imagery // *Journal of Marine Science and Engineering* 2019, 7, 276

#### **Свидетельства о регистрации программ**

143. 2020622371. Новоявчев А.В., Терёхина Я.Е. База данных гидрографических изысканий (DB), 2020
144. 2020660123. Токарев М. Ю., Терёхина Я. Ев., Галаев В. Е., Куликова Д. С., Бирюков Е. А., Пронин И. С. Интеллектуальная система сегментации картографических результатов морских площадных геофизических исследований «ScanGMapping» (SOFT), 2020
145. 20206131092020. Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Галаев В.Е. Модуль обработки и анализа данных гидрографических изысканий (SOFT) 2020

#### **Интернет-источники**

146. Арктическая зона РФ [Электронный ресурс]: Официальный сайт Администрации города Ноябрьска. – Режим доступа: <https://admnoyabrsk.ru/> (дата обращения: 25.07.2024)

147. Морские исследовательские работы [Электронный ресурс]: Об Инновационном Центре «Морские и подводные технологии». – Режим доступа: <http://incseatech.ocean.ru/> (дата обращения: 23.07.2024)
148. Hydrographic survey [Электронный ресурс]: EMGEPRON. – Режим доступа: <https://www.marinha.mil.br/emgepron/en-us/node/223> (дата обращения: 23.07.2024)
149. WASSP — многолучевые эхолоты [Электронный ресурс]: Furuno. – Режим доступа: <https://furuno.ru/rybopoiskovoe-oborudovanie/wassp-mnogoluchevye-ehkholoty/> (дата обращения: 23.07.2024)
150. The Advanced Land Observing Satellite Project [Электронный ресурс]: JAXA. – Режим доступа: [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index_e.htm) (дата обращения: 27.09.2024)