

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Алёшин Михаил Игоревич

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЫ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.6.9 – Геофизика (геолого-минералогические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Токарев Михаил Юрьевич

Москва — 2023

Оглавление

Оглавление	2
Введение	4
Глава 1. Методы геолого-геофизических исследований геологического разреза на пресноводных акваториях.....	12
Глава 2. Геолого-геофизическая изученность Онежского озера и Петрозаводской губы...	21
Глава 3. Полевые исследования	28
3.1 Геофизическая аппаратура и программное обеспечение, использовавшиеся в ходе полевых исследований.....	29
3.2 Методика проведения полевых и лабораторных исследований.....	40
3.2.1 Общие сведения.	40
3.2.2 Сейсморазведка сверхвысокого разрешения с приповерхностной системой.....	44
3.2.3 Сейсморазведка сверхвысокого разрешения с заглубленной системой.....	45
3.2.4 Гидролокация бокового обзора	47
3.2.5 Акустическое профилирование	48
3.2.6 Донная электротомография.....	49
3.2.7 Геологический пробоотбор	50
3.2.8 Инженерное бурение со льда.....	52
3.2.9 Лабораторные исследования керна	53
Глава 4. Обработка и анализ результатов полевых наблюдений.....	59
4.1 Обработка сейсмоакустических данных.....	59
4.2 Особенности графа обработки данных, полученных заглубленной системой.	70
4.3 Обработка данных электротомографии.....	72
4.4 Обработка данных гидролокации бокового обзора.....	74
4.5 Обработка данных акустического профилирования	77
Глава 5. Геологическая интерпретация	82
5.1 Сейсмостратиграфическая интерпретация данных	82

5.2 Количественная оценка физических свойств.....	90
5.3 Геоморфологический анализ данных.....	99
5.4 Идентификация потенциально опасных геологических процессов и явлений.....	106
Заключение.....	120
Сокращения.....	123
Список иллюстраций.....	124
Список таблиц	130
Список литературы	131

Введение

Актуальность изучения Великих озер Европы и их отложений связана с изучением геологического строения, истории развития, нынешнего состояния и прогноза их дальнейшего изменения. При масштабных объемах работ, проводящихся на территории шельфа в погоне за поиском и добычей углеводородов, такие огромные водоемы, как Онежское и Ладожское озера, остаются практически неизученными, хотя они ощутимо влияют на жизнь близлежащих населенных пунктов и экологическое состояние региона целом. Основопологающим их значением является тот факт, что эти озера являются крупнейшими резервуаром питьевых вод. Знание истории их развития позволяет оценивать сохранение первичных качеств этой воды и прогнозировать ухудшение или сохранение её запаса.

В настоящее время при изучении озер основное внимание уделяется прямым методам исследования: отбору керн рыхлых отложений гравитационными трубками и его последующему комплексному изучению литолого-геохимическими, геохронологическими, биостратиграфическими и другими методами. Причем используются преимущественно трубки типа ГОМН т. е длиной до 1, реже до до 1.5 м. Первые итоги изучения геологического строения Ладожского и Онежского озер были подведены в двух монографиях Н. И. Семеновича, посвященные геологическому строению каждой из озёрных котловин (Семенович, 1966, 1973).

Отсутствие бурения и пробоотбора с вибро-трубками в крупных озерах обуславливает недостаточную степень изученности структуры их осадочного чехла. В связи с этим большое значение приобретают косвенные геофизические и, прежде всего, сейсмоакустические методы, которые позволяют наглядно получить представление о форме геологических тел и благодаря этому определить возможные варианты генезиса слагающих их осадочных образований. Выделение в сейсморазрезе различных по физическим свойствам толщ и установление их геологического возраста, в свою очередь, является основой для реконструкции палеогеографических условий, в том числе, чередования наземных и подводных палеоландшафтов.

Помимо этого, по результатам геолого-геофизических исследований на акватории озер обнаруживаются газонасыщенные осадки (Алёшин 2018, 2021). Задача поиска газов в донных осадках морей является актуальной и важной как минимум по двум аспектам:

- скопления газов в донных осадках, формируя зоны аномального пластового давления (АПД), представляют реальную опасность при проведении морских геологоразведочных работ, а также при бурении и эксплуатации скважин;

- обнаружение газонасыщенных осадков необходимо для газогеохимических съемок на поисково-разведочной стадии освоения углеводородного сырья.

Во многих морях, в том числе и на северо-западе России, на таких как Баренцево, Белое, Карское и Балтийское, проведены многочисленные газогеохимические исследования, отработана методика таких работ, получены важные как чисто научные, так и практические результаты (Ферсман, 1939; Соколов, 1947, 1971; Карцев и др., 1954; Успенский, 1956; Стадник, 1984; Соловов, 1985; Галимов, 1989; Ворошилов, 1996, Ванисов и др., 2005; Шакиров, 2015). При этом до недавнего времени такие работы совершенно не проводились на Ладожском и Онежском озерах, входящих в систему Великих озер Европы. Во многом это было связано с резким ограничением возможностей проведения озерных геологических исследований из-за угрозы даже минимального загрязнения, т. к. сами озера являются стратегическим запасом питьевых вод, в том числе для крупнейших городов: Санкт-Петербурга, Петрозаводска и других.

В 2015-2020 гг. сотрудниками кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета и Центром морских исследований МГУ были выполнены полевые геолого-геофизические работы на Онежском озере в рамках нескольких проектов:

- «Экспедиция на Ладожское озеро для изучения рельефа и рыхлого покрова и палеогеографического развития в позднем неоплейстоцене-голоцене»,
- «Комплексная экспедиция на Онежское и Ладожское озера для изучения строения четвертичного покрова Великих Европейских озер, выявления геологических опасностей и поддержки проведения международной Молодежной практической школы по методам изучения донных ландшафтов»
- Геофизические методы разведки и оценки геологических рисков при освоении месторождений углеводородов на шельфе Российской Федерации» (Сколтех).

Работы выполнялись при участии партнеров: Института водных проблем Севера Карельского Научного Центра РАН и Санкт-Петербургского Государственного Университета, которыми было проведено частичное финансирование экспедиций. Выполненный комплекс геофизических исследований включал в себя непрерывное сейсмоакустическое профилирование, многоканальную сейсморазведку, параметрическое профилирование и гидролокацию бокового обзора. Пробоотбор выполнялся гравитационными трубками и дночерпателем. Полученные при пробоотборе образцы грунта были исследованы в лаборатории для изучения физико-механических, акустических, теплофизических свойств и гранулометрического состава.

В настоящей работе анализируются результаты большого объема выполненных с участием автора диссертации полевых геолого-геофизических и камеральных исследований, направленных на комплексное изучение геологического строения и свойств четвертичных осадков, в том числе газонасыщенных, которые впервые были обнаружены на акватории Петрозаводской губы.

Степень разработанности темы исследований

Исследования на Онежском и Ладожских морях, начавшиеся в 70-х годах, носили, в основном, прикладной характер и были направлены на решение задач геоэкологии, региональной геологии, седиментологии и геохимии. В этот период научные результаты были изложены в работах Н. Н. Давыдовой, Д. Д. Квасова, Д. А. Субетто, А. Е. Рыбалко, В. И. Хомутовой, С. М. Усенкова, В. А. Щербакова, А. В. Амантова (обработка сейсмоакустических данных ВСЕГЕИ, Г. С. Бискэ и др.). Помимо пробоотбора, в 2000-х годах разными учеными на малых озерах была отработана методика высокоразрешающих биостратиграфических и литологических исследований на отобранном керне, а также бурения толщ рыхлых отложений до коренного цоколя по периферии озерного бассейна. Однако при изучении больших озер применение такой методики было затруднено в связи с тем, что бурение с плотов и других малых плавсредств на больших глубинах акваторий технически сложно и дорогостояще. Кроме того, крупнейшие озера обычно используются как стратегический резерв питьевой воды для обширных территорий, что накладывает определенные ограничения на проведение геологоразведочных работ

В 2015-2020 гг. сотрудниками кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета и Центром морских исследований Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова были выполнены ряд проектов: «Экспедиция на Ладожское озеро для изучения рельефа и рыхлого покрова и палеогеографического развития в позднем неоплейстоцене-голоцене», «Комплексная экспедиция на Онежское и Ладожское озера для изучения строения четвертичного покрова Великих Европейских озер, выявления геологических опасностей и оценка геологических рисков при освоении месторождений углеводородов на шельфе Российской Федерации» (Сколковский институт науки и технологий). В рамках комплекса с геофизических исследований были выполнены непрерывное сейсмоакустическое профилирование, многоканальная сейсморазведка, акустическое профилирование и гидролокация бокового обзора. Дополнительно было выполнено изучение верхней части геологического разреза с помощью гравитационного пробоотбора. Полученные при пробоотборе образцы грунта были исследованы в лаборатории для изучения физико-механических, акустических, теплофизических свойств и гранулометрического состава.

В настоящей работе анализируются результаты полевых комплексных геофизических и камеральных исследований, направленных на изучение геологического строения четвертичных

отложений и свойств осадков, в том числе газонасыщенных, которые впервые были обнаружены на акватории Петрозаводской губы.

Цель работы

Исследование четвертичных отложений геологического разреза Петрозаводской губы Онежского озера комплексом геофизических и инженерно-геологических методов для выделения структурных особенностей, оценки свойств и состава осадков и идентификации потенциально опасных геологических процессов и явлений.

Задачи, поставленные для достижения указанной цели:

1. Проведение полевых геофизических и инженерно-геологических исследований с целью установления структуры осадочного чехла четвертичного возраста Петрозаводской губы Онежского озера, оценке состава и свойств слагающих его пород
2. Получение полевых данных высокого качества, необходимых для последующей обработки материалов и их интерпретации.
3. Количественная оценка физических свойств изучаемых осадков методами сейсмоакустической и электротомографической инверсии.
4. Сейсмостратиграфическая интерпретация данных.
5. Комплексная интерпретация геофизических и инженерно-геологических данных, полученных на акватории Петрозаводской губы Онежского озера.
6. Прогнозирование площадей с наличием признаков потенциально опасных геологических процессов и явлений на акватории Петрозаводской губы.

Объект исследования: акватория Петрозаводской губы Онежского озера.

Предмет исследования: строение и свойства четвертичных отложений Петрозаводской губы Онежского озера.

Фактический материал и методы

Материалы для диссертационной работы были собраны автором в ходе полевых работ 2014 – 2019 гг, включавших нижеописанные методы исследований. За этот период было изучено более 400 пог. км профилей сейсмоакустической съёмки и гидролокации, отобрано 40 колонок донных отложений. В работе были использованы впервые полученные результаты стационарного бурения со льда Петрозаводской губы – 2 керны донных отложений мощностью до 11 м. При интерпретации геофизических материалов автор использовал данные государственной геологической карты масштаба 1:1000000 (лист Р-36, Петрозаводск, 2002 г.) и материалы российско-германского проекта PLOT. На этапе выбора оптимальной методики ряда исследований использовались данные GRID-модели рельефа дна Онежского озера, составленной

в ИВПС КарНЦ РАН, а также материалы сейсмоакустических исследований и гидролокации бокового обзора.

При проведении полевых работ на акватории были использованы следующие методы исследований:

- сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР) с приповерхностной приемно-излучающей системой;
- ССВР с заглубленной приемно-излучающей системой;
- Гидролокация бокового обзора (ГЛБО);
- Акустическое профилирование (АПр);
- Донная электротомография (ЭТ);
- геологический пробоотбор, инженерное бурение со льда и лабораторные исследования керна;

Степень достоверности результатов исследований подтверждается сходимостью результатов интерпретации геофизических материалов с данными геологического пробоотбора, сопровождаемого палинологическими исследованиями, радиоуглеродным датированием и КТ-рентгенографией, и данными первого бурения рыхлого покрова Онежского озера в Петрозаводской губе в 2019 году. Кроме того, достоверность обеспечивается высокой точностью и кондиционностью результатов сейсмоакустических исследований, позволивших выполнить локальный прогноз опасных геологических процессов и явлений (ОГПЯ), в частности, области площадного распространения газонасыщенных осадков и зон сфокусированной разгрузки флюидов.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в 4 полевых инженерно-геофизических экспедициях в качестве начальника геофизической партии и обработчика. На камеральном этапе автор занимался обработкой и интерпретацией данных, лабораторными исследованиями образцов, а также принимал участие в написании и апробации компьютерной программы SborEx для сбора геофизических данных. Результаты исследований четвертичных осадков Петрозаводской губы изложены в работах [1-3, 73] совместно с коллективом исследователей. В этих работах автор внес основополагающий вклад (50-60% от общего объема работы). Дал геологическую интерпретацию инженерно-геофизических данных и составил финальные карты мощностей четвертичных отложений и геологических разрезов для исследуемой акватории. Автором написаны разделы монографии «Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к

современным условиям» [57]. Вклад автора в статью [91], посвященную комплексной интерпретации геолого-геофизических методов составляет 10%.

Научная новизна

На акватории Петрозаводской губы Онежского озера впервые был апробирован уникальный комплекс геолого-геофизических исследований, учитывающий пресноводные озерные условия. Результаты, полученные с помощью измерительного комплекса, доказали высокую эффективность для сеймостратиграфического расчленения разреза, что послужило основой для составления карты четвертичных отложений и геоморфологической карты Онежского озера. Высокая точность сейсмо- и гидроакустических данных впервые позволили выявить признаки потенциально опасных геологических процессов и явлений, распространенных на акватории Петрозаводской губы Онежского озера, а также определить физические свойства четвертичных отложений.

Теоретическая значимость работы

В результате исследований осадков Петрозаводской губы Онежского озера были получены сведения, позволяющие более полно изучить верхнюю часть геологического разреза. Это позволило выделить сейсмоакустические горизонты, которые ложатся в основу существующей концепции развития Онежского озера. Результаты определения физических характеристик осадков: скорости продольных волн, плотности, акустического импеданса, удельного электрического сопротивления, коэффициентов отражения вносят существенный вклад в теоретические основы структурной организации и функционирования озерных экосистем Северо-Запада России. Важное значение при изучении пресноводных водоемов имеют, предложенные автором, методические и практические основы идентификации зон распространения потенциально опасных геологических процессов и явлений, в частности, области площадного распространения газонасыщенных осадков и зон сфокусированной разгрузки флюидов.

Практическая значимость работы

Получение сведений как о современном состоянии, так и истории развития Великих озер Европы является важной задачей, так как эти озера представляют собой стратегические источники пресной воды. Выполненная научная работа позволяет более полно изучить историю развития Онежского озера. Полученные картографические материалы включены в проект «Мониторинг государственной геологической карты масштаба 1:1000000 территории Российской Федерации и ее континентального шельфа» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»). В ходе исследований Петрозаводской губы была разработана и испытана компьютерная программа для сбора сейсмоакустических данных SborEx (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016618288), которая может быть рекомендована при проведении

сейсмоакустических работ на акваториях. Важное практическое значение для пресноводных акваторий имеют результаты обнаружения признаков газонасыщенности в осадках, полученные комплексом геофизических и инженерно- геологических методов.

Защищаемые положения:

1. Сформированный программно-аппаратный геофизический комплекс для пресноводных акваторий позволяет получить детальное расчленение четвертичных отложений с вертикальной разрешающей способностью не менее 0.5 м и производить количественные оценки физических свойств четвертичных осадков.

2. Строение четвертичных отложений Петрозаводской губы Онежского озера включает в себя четыре сейсмокомплекса: средне- и верхне-голоценовые озерные илы и гитии; нижне-голоценовые озерные илы гомогенизированные и глины; озерно-ледниковые ленточные глины осташковского горизонта; ледниковые отложения и флювиогляциальные пески осташковского горизонта, расположенных на подстилающем их докембрийском кристаллическом фундаменте.

3. На акватории Петрозаводской губы Онежского озера комплексом геофизических методов идентифицированы следующие опасные геологические процессы и явления: следы техногенного воздействия, потенциально опасные подводные объекты, газонасыщенные грунты, каналы миграции газов, зоны литологической неоднородности, выходы скальных грунтов, палеоврезы и тектонические нарушения.

Апробация работы

Отдельные части работы докладывались на российских и международных конференциях: «MARESEDU» (2018, 2019, 2020, гг., Москва), «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» (19-24 мая 2019 г., Казань), «Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status and young scientist school in microscopy skills in Paleolimnology» (1-4 октября 2018, Казань), «Lateral-Interglacial transition: glaciotectonic, seismoactivity, catastrophic hydrographic and landscape changes» (19-25 августа 2018 г., Петрозаводск). Автор имеет свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016618288. По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, 1 статья в журнале из списка ВАК, 1 монография, статьи в сборниках.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату тех. наук М. Ю. Токареву, а также доктору геол.-мин. наук А.Е. Рыбалко и доктору физ.-мат. наук М. Л. Владову за плодотворные идеи и возможность их воплощения в рамках диссертационной работы. Отдельные слова благодарности автор адресует коллегам из Карельского научного центра Российской академии наук, в частности доктору геогр. наук Д. А. Субетто, научной компании

«Сплит» и Центра Анализа Сейсмических Данных МГУ за помощь в проведении полевых и лабораторных испытаний, а также преподавательскому составу кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ за полученные знания, которые каждый день востребованы в работе и жизни. Кандидату физ.-мат. наук А. А. Бобачеву, кандидату физ.-мат. наук А. Н. Ошкину и А. К. Миринец за активное участие в изучении электрических и акустических свойств осадков Онежского озера. Спасибо кандидату геол.-мин. наук Л. А. Золотой за чуткость, внимательность и помощь в ходе подготовки диссертации. Качеством полевых материалов автор также обязан экипажу НИС «Профессор Зенкевич», «Эколог», «Посейдон». В процессе написания диссертационной работы автор имел постоянную поддержку от родителей и жены, кандидата геол.-мин. наук К. Ф. Алёшиной, которых от всего сердца благодарит за проявленное терпение.

Глава 1. Методы геолого-геофизических исследований геологического разреза на пресноводных акваториях

Две системы: огромных озер Земли вполне могут быть названы пресными морями. Это Великие американские озера — Верхнее, Мичиган, Гурон, Эри, Онтарио — и Российские: Ладожское и Онежское, которые хотя и уступают в размерах американским, тем не менее являются крупнейшими в Европе и относятся к Великим Европейским озерам.

Водоемы великих озер являются стратегически важными объектами и вызывают большой интерес у исследователей различных научных направлений. Геолого-геофизические исследования проводятся на озерах во многих странах мира: опубликованы результаты работ специалистов из Института геологии, минералогии и палеонтологии Штайнмана (г. Бонн, Германия), Мексиканского геофизического института, Уппсальского и Альбертского университетов и т.д. (Bücker M., et al 2017; Cukur D., 2013; Greenwood S. L., et al, 2015; Naflidason H., et al, 2019). Целями проведения этих геолого-геофизических работ являлись:

1. Изучение геологического строения верхней части разреза;
2. Определение инженерно-геологических условий и идентификация опасных геологических процессов и явлений;
3. Экологические и ландшафтные исследования.

Для эффективного решения обозначенного широкого спектра задач не существует единственного геофизического или инженерно-геологического метода. Это обуславливает необходимость разработки и практического применения комплекса методов, который позволил бы, с одной стороны, получить данные о генеральном строении геологического разреза, а с другой – детально изучить четвертичные отложения осадочного чехла. При этом эффективно использовать как дистанционные геофизические методы – сейсмоакустические, гравимагнитные, электромагнитные, – так и прямые методы обследования с геологическим отбором проб. Подобный комплекс исследований на шельфе Российской Федерации на современном этапе выполняется в соответствии со сводом правил «Инженерные исследования для строительства на континентальном шельфе. Общие требования» (СП 504,1325800.2021, 2021).

Рассмотрим основные особенности геофизических методов исследований, применяемых на пресноводных акваториях.

К основным методам инженерно-геофизических исследований в данном случае относятся: гидроакустические – акустическое профилирование (АПр) гидролокация бокового обзора (ГЛБО), многолучевое эхолотирование (ЭХО); также сейсмоакустические в высокочастотных

модификациях – сейсморазведка ультравысокого разрешения (СУВР, высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование (ВЧ НСП). К вспомогательным – сейсморазведка с многокомпонентными донными станциями (СДМС), сейсмоакустические исследования в скважинах и электроразведка (ЭР).

Для изучения строения верхней части геологического разреза используется сейсморазведка сверхвысокого (ССВР) и ультравысокого разрешения (СУВР) с электроискровыми (Рис.1) (Калинин А.В., Калинин В.В., 1983) и электродинамическими излучателями (Edgerton, H. E., et al., 1964). При инженерных работах на шельфе типичная энергия при работе с электроискровыми излучателями излучения не превышает 2.5 кДж, что позволяет, не увеличивая размер излучателя добиваться глубинности до 150 м по грунту. (Haflidason 2019; Крылов 2014; Нигмедзянова, 2002; Электроискровой..., 1989). Применение подобной методики накладывает требования к судну. В частности, высоковольтное излучение для таких источников во время работы должно быть надежно заземлено, защищено от влаги, перепадов температуры и находиться на удалении от членов экспедиции. При этом мощность, вырабатываемая судовым генератором напряжения, тоже должна быть достаточной для обеспечения работы прибора. Таким образом, применение подобных устройств на катерах и маломерных лодках ограничивается размером плавательного средства и возможностью размещения электрического генератора достаточной мощности.

Важно учитывать, что для работы в пресноводных акваториях, применение классического электроискрового излучателя невозможно. Возможным решением в таком случае является применение электроискровых излучателей в контейнере с солевым раствором (Калинин А.В., Калинин В.В., 1983). Это в свою очередь усложняет конструкцию излучателя и делает замену и починку излучателя более трудоемкой. Электродинамические излучатели такой проблемой не обладают, но, в свою очередь, частотный состав излучаемого сигнала у них, как правило, выше и лежит в диапазоне 1500-2000 Гц, что необходимо учитывать при планировании работ.



Рис.1. Внешний вид одного из вариантов конструкции электроискрового излучателя SplitMultiSeis. При работе на пресноводных акваториях излучающие секции помещаются в контейнер, наполненный солевым раствором.

На кафедре геофизики Казанского государственного университета (КГУ) был разработан и создан сейсмоакустический комплекс, специально предназначенный для изучения озерных бассейнов в комплексе палеомагнитных исследований (Борисов, 2004). Данный комплекс подразумевает использование пьезоэлектрических и электродинамических источников и обладает следующими характеристиками:

- 1) разрешенность записи - не ниже 10 см;
- 2) глубинность исследования различных типов озерных осадков - не менее 10 м;
- 3) цифровая регистрация информации;
- 4) портативность, небольшое энергопотребление, возможность использования надувных плотов и лодок для проведения исследований;
- 5) геодезическое позиционирование системы в пределах единиц метров;
- 6) высокая производительность - км акустического профиля в час;
- 7) возможность использования аппаратуры на различных озерах в широком диапазоне глубин.

Однако, данный комплекс предназначен в первую очередь для детального изучения верхней части геологического разреза и не так эффективен при целевых глубинах порядка.

Для детального изучения структуры и свойств донных осадков, а также для последующего выбора точек геологического пробоотбора используют гидроакустические методы (Heinrich 2018, Greenwood 2015). Акустические профилографы (Рис.2) преимущественно представляют собой комплекс приборов, состоящий из приемно-излучающей пьезокерамической антенны, высоковольтного блока формирования сигнала, блока регистрации и первичной обработки данных. Наиболее широко распространенными являются параметрические антенны (Новиков,

Тимошенко, 1989). Они обладают рядом преимуществ по сравнению с непараметрическими аналогами и подходят для применения в пресноводных условиях. У них практически отсутствуют боковые лепестки диаграммы направленности, антенны являются малогабаритными, а также присутствует возможность легко программно изменять частоту излучения. Буксируется подобный прибор как правило на жесткой штанге, прикрепленной к борту судна, что позволяет использовать его для более точного выбора точек геологического пробоотбора.



Рис.2 Блок управления и антенна параметрического профилографа SES-2000 compact.

В ситуациях, когда сейсмоакустические методы являются неэффективными (газонасыщенные осадки, мерзлота и др.), для расчленения верхней части геологического разреза применяются электромагнитные методы исследований, такие как георадиолокация (Старовойтов и др., 2015; Павлова и др., 2021; Binley, Kemna, 2005, Рязанцев и др., 2015) и электротомография (Kaufman et al., 2014; Bucker et al., 2017; Бобачев и др., 2018).

При работе на малых глубинах в пресноводных условиях для уточнения грунтовых условий также эффективно используется георадиолокация (Павлова В.Ю. 2021). Часто для более точной геологической интерпретации используется комплекс методов, включающий себя как электроразведку и сейсморазведку. Это актуально, так как по данным сейсморазведки, либо георадара, особенно при наличии скважинных данных, можно с высокой степенью точности судить о геометрии сейсмоакустических комплексов, а затем использовать их как одно из условий расчета электромагнитной инверсии (Буданов и др., 2017).

Проведении работ, нацеленных на определение инженерно-геологических условий и идентификацию опасных геологических процессов и явлений отличается от научных исследований верхней части геологического разреза более жесткими требованиями к параметрам геофизических исследований. Под инженерно-геологическими условиями подразумевается комплекс современных геологических особенностей, определяющих условия инженерных

изысканий, строительства и эксплуатации инженерных сооружений (Трофимов В.Т. 2007). Эти инженерные исследования включают в себя геологическое строение местности, рельеф, гидрогеологические и мерзлотные условия и современные геологические процессы.

Для решения подобных задач последнее десятилетие широко используются комплексные геолого-геофизические исследования, включающие в себя гидроакустические и сейсмические наблюдения с донными и буксируемыми много канальными системами, геологический пробоотбор и инженерно-геологическое бурение (Иванова Н.М. и др., 2011). В условиях северных крупных водоемов, в частности, на озерах проводятся комплексные исследования для определения границ оледенения и последующих палеореконструкций (Sarah L., 2015).

Помимо этого, сейсмоакустические методы позволяют выделить различные опасные геологические процессы и явления, в частности наличие газонасыщенных осадков (Крылов, 2015). Метод ГЛБО (Рис.3) также широко используется при идентификации опасных геологических процессов на дне. В частности, их используют для выявления выходов газов и поиска зон сфокусированной разгрузки флюидов (Maksimov, 2003).



Рис.3 Пример компактного комплекта гидролокации бокового обзора, буксируемого за судном на кабель-тросе.

Основным геологическим методом изучения осадков является инженерное бурение с отбором керна и пробоотбор с гравитационными трубками длиной 1-5 м. Пробоотборник обычно снабжен кернорвателем, служащим для препятствования выпадению керна, а также пластиковым вкладышем-гильзой. Это позволяет получить минимально нарушенный грунта. Извлечение керна осуществляется посредством вытягивания пластиковой гильзы на палубе и ее разделением для дальнейших исследований и испытаний. Часть пластиковых трубок может сохраняться без извлечения из них керна для транспортировки в стационарные лаборатории.

Для определения инженерно-геологических условий используются прямые измерения на керне и лабораторные исследования грунта (Greenwood et al., 2015, JUHA PEKKA LUNKKA,

2014). В лабораторных условиях возможно получать различные физико-механических химические свойства осадков. Наиболее частыми задачами является изучение прочностных характеристик грунта, а также акустических, электрических и геохимических свойств, в РФ подобные процедуры выполняются в соответствии с нормативными документами (СП 504,1325800.2021, 2021).

При проведении экологических и ландшафтных исследований одной из основополагающих задач является изучение донной поверхности. Для этого помимо сейсмических методов используется многолучевое эхолотирование (МЛЭ) и гидролокация бокового обзора (Блинова Е.И. 2005). Первый из этих методов служит для построения детальных карт рельефа дна. Антенна размещается на штанге у борта судна, затем осуществляется калибровка и площадная съемка по системе профилей, в результате чего строится цифровая модель рельефа дна (Науменко и др., 2014).

Гидроакустические наблюдения методами ЭХО и ГЛБО используются совместно с лидаром, аэрофотосъемкой и подводными теле-аппаратами для подробного изучения донных объектов (Chelsea Wiseman, 2021). Комбинация мультиспектральных гидроакустических методов позволяет разделять различные текстуры донных осадков, решая задачу картирования донных ландшафтов (Elias Fakiris, 2019). На рис. 4 приведен пример применения для такой установки. При интерпретации данных гидроакустических наблюдений эффективно применяются методы геостатистического анализа для выделения различных типов ландшафта (Терехина Я.Е. 2021).

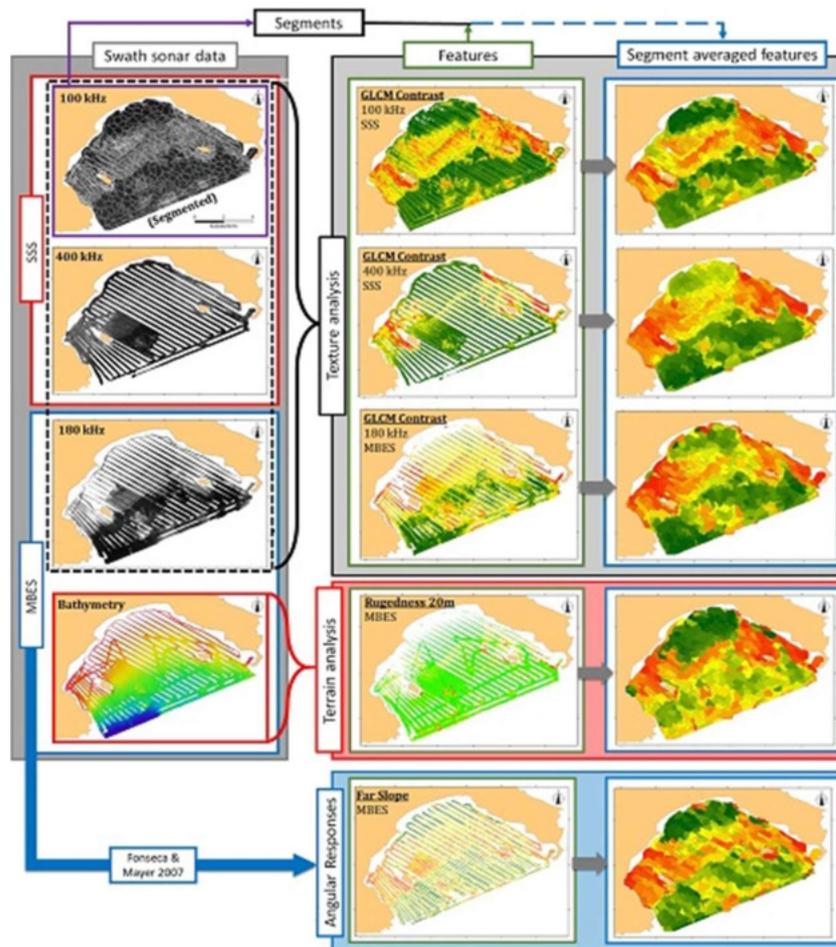


Рис.4 Результат применения мультимастотных гидроакустических данных для изучения донных ландшафтов (из Elias Fakiris, 2019).

Таким образом, проведенный обзор по разнообразию современных геолого-геофизических методов позволяет сделать вывод о высокой степени надежности результатов с высокой детальностью изучения структуры и свойств осадков.

Однако для того, чтобы определить наиболее эффективные методы для изучения Онежского озера, необходимо дать полную характеристику целевого объекта и установить его особенности, т.к. условия, в которых находится объект исследований, связаны с рядом ограничений в технике и методике геологических исследований.

Во-первых, Онежское озеро представляет собой стратегический природный резервуар пресной воды. В связи с этим получение прямых данных о составе и строении осадочного чехла накладывают ограничения на методы бурения, которые не нарушали бы условия охраны окружающей среды в акватории.

Во-вторых, для косвенного геологического изучения применение ряда стандартных геофизических средств в условиях пресных и малоглубинных (до 100 м) вод технически невозможно.

В-третьих, в районе работ ограничено число плавсредств, подходящих для геофизических работ по техническим характеристикам.

Учитывая перечисленные выше факторы, комплекс задач, которой ставится перед геолого-геофизической съемкой, не может быть решен отдельными методами. Для этого необходимо сформировать комплекс, включающий в себя как геофизические, так и геологические, а также лабораторные методы исследований.

Для решения задачи картирования и изучения четвертичных отложений геологического строения верхней части разреза, необходимо обеспечить глубинность, достаточную для выделения кровли кристаллического фундамента, а также разрешающую способность геофизических методов, позволяющую на этапе интерпретации производить корреляцию сейсмоакустических горизонтов, представленных в четвертичных отложениях.

Для определения инженерно-геологических условий и идентификации опасных геологических процессов и явлений на озёрах, используемый комплекс должен включать в себя методы, позволяющие дать оценку физических свойств осадков. Помимо этого, важную роль имеет строение осадочных толщ и их мощности не только в разрезе, но и в плане.

Для проведения экологических и ландшафтных исследований необходимо использовать методы, дающие представление о строении донных осадков, глубине и характере их залегания, а также физических свойствах.

Исходя из условий проведения съемки, для решения поставленной задачи изучения строения и физических свойств четвертичных отложений в условиях Онежского озера, с участием автора диссертации было предложено сформировать следующий комплекс геолого-геофизических методов:

- Гидролокацию бокового обзора
- Акустическое профилирование
- Сейсморазведку сверхвысокого разрешения
- Сейсморазведку ультравысокого разрешения
- Геологический пробоотбор и инженерное бурение
- Лабораторные исследования керна

Применение такого комплекса методов может дать исследователю конкретную информацию: а) сейсмоакустические методы позволят провести расчленение геологического разреза на сеймокомплекс; б) гидроакустические методы обеспечат высокую детальность донных исследований; в) точный геологический пробоотбор и бурение позволят производить обоснованную геологическую интерпретацию геофизических данных для оценки тектонических условий, геологических процессов и истории осадконакопления в районе работ; г) оценку

физико-химических свойств грунтов по результатам электроразведочных, лабораторных и камеральных методов исследования.

При этом, для получения наиболее полной картины строения и свойств четвертичных отложений Петрозаводской губы необходимо было провести площадные исследования, которые, во-первых, позволили бы проследить общие тенденции геологического строения изучаемой толщи осадков и более подробно проследить историю развития озера, и, во-вторых, могли бы быть использованы для построения инженерно-геологических карт для последующего проведения инженерных работ на акватории.

Глава 2. Геолого-геофизическая изученность Онежского озера и Петрозаводской губы

Онежское озеро (абс. отм. 33 м) является вторым по величине в Европе, относительно глубоководным водоемом (средняя глубина 30 м, максимальная – 120 м) (Рис.5). Площадь зеркала озера составляет 9720 км².



Рис.5 Положение полигона исследований (красный контур) на физической карте Онежского озера.

Систематическое изучение Онежского озера началось в конце XIX в. первоначально учеными Русского географического общества (Семенович, 1966). К настоящему времени выявлены особенности формирования котловины озера, изучены современное состояние гидрологических и гидрофизических процессов и явлений, биоты и гидрохимические характеристики водной толщи, состав и свойства грунтов (Онежское..., 2010).

Котловина озера расположена в пределах Карельского массива Балтийского щита. Северная часть котловины имеет пространственную связь с так называемой Онежской мульдой (Бискэ и др, 1971) или Онежской депрессией (Онежская..., 2011) – наложенной синклинальной структурой, в которой обнажены протерозойские вулканогенно-осадочные породы, несогласно перекрывающие архейский комплекс основания Карельского массива. Отложения Онежской депрессии деформированы складчатыми и разрывными нарушениями, и ее сложная структура наследуется в современном рельефе северной части котловины Онежского озера. В южной части котловины Карельский массив перекрывается палеозойским осадочным чехлом Восточно-Европейской платформы. В целом, формирование озера связано с новейшей тектоникой и ледниковой деятельностью в зоне сочленения древнего Балтийского щита и Русской плиты. Ледники отступали с относительно «мягких» осадочных пород Русской плиты на прочные кристаллические породы щита, задерживаясь возле его края. На юге, как и в Ладожском озере, сформировалась обширная пологая впадина, которая затем заполнилась озерными водами в позднем неоплейстоцене-голоцене. Современные очертания озера сформировались в результате гляциоизостатического поднятия Карельского перешейка, повлекшего за собой перекоп котловины (Шаров, Журавлев, 2019).

Движение ледников в пределах котловины контролировалось древними тектоническими структурами и происходило преимущественно с северо-запада на юго-восток. В неоплейстоцене через Онежскую впадину в этом направлении происходило перемещение Онежско-Белозерской лопасти Скандинавского ледникового щита. При этом вследствие экзарации практически были уничтожены более древние ледниковые и межледниковые отложения. В результате, в поздневалдайское время практически весь бассейн Онежского озера был перекрыт льдами этой лопасти (Карельским ледником). Деграция ледникового покрова в Онежской впадине началась около 13–14 тыс. лет назад и завершилась около 11.6 тыс. лет назад (Демидов, 2005; Филимонова, Лаврова, 2017; Saarnisto, Saarinen, 2001). Позднее, всего через 1.5 тыс. лет после освобождения северных побережий озера от материкового льда, активизировались гляциоизостатические движения земной коры. Этот процесс сопровождался сильными землетрясениями с максимальными магнитудами 5.8–6.8 (Никонов, Шварев, 2015). В настоящее время построены модели освобождения впадины Онежского озера от ледникового покрова (Субетто и др., 2019). Однако большая часть заливов (кроме губы Кондопога и частично залива Большое Онего) в геологическом отношении изучены слабо, в первую очередь, ввиду отсутствия доступных результатов сейсмоакустических исследований и тяжелого геологического пробоотбора.

Состав донных отложений Онежского озера анализировался финскими исследователями (Saarnisto, Saarinen, 2001) по данным 6 проб, отобранных трубкой Кулленберга в 1992 - 1994 гг (Рис.6). Длина проб составляла от 3,66 до 11,6 м, отбор производился с глубин от 20 до 53 м. В

соответствии с этими данными, отложения дна озера представлены озерно-ледниковыми ленточными глинами позднеледниковья, перекрытыми озерными алевритами и илами голоцена (рис. 8). Ленточные глины мощностью до 8 м формировались в приледниковом водоеме, и обычно залегают на морене последнего поздневалдайского оледенения на большей части дна озерной котловины, а также в пределах прилегающих низменностей до абсолютных высот 80-90 м. Глины обычно серого или коричневого цвета, встречаются розовые и почти черные. Мощность годичных слойков – «варв», отражающая скорость осадконакопления, изменяется от первых сантиметров в основании толщи до первых миллиметров в ее кровле. Глинистые фракции донных отложений представлены кварцем, полевыми шпатами, амфиболами, слюдами и хлоритами. Реже встречается кальцит, шунгит, каолинит и тальк.

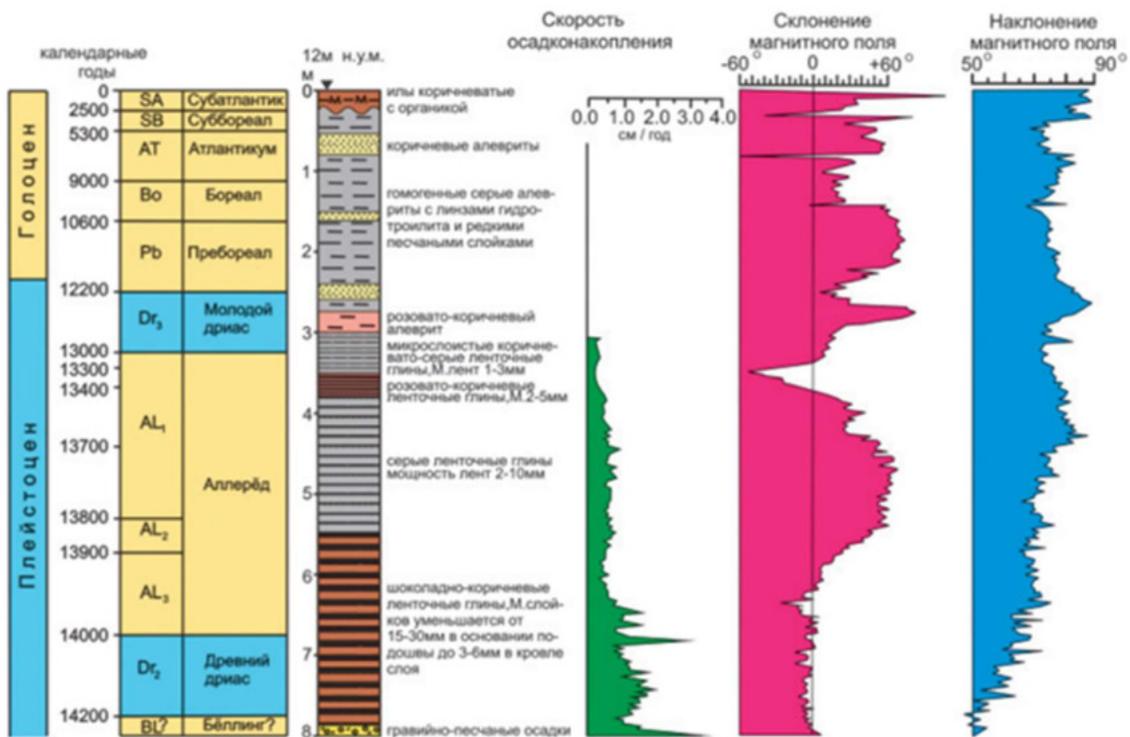


Рис.6 Состав донных отложений Онежского озера по пробоотбору (Saarnisto, Saarinen, 2001).

По результатам обобщения геолого-геофизических исследований, проводившихся преимущественно на суше, были построены схемы максимальной стадии развития Онежского приледникового озера (ОПО) (Рис.7), а также реконструкции процессов, связанных с дегляциацией Онежского озера (Демидов 2005, 2006).

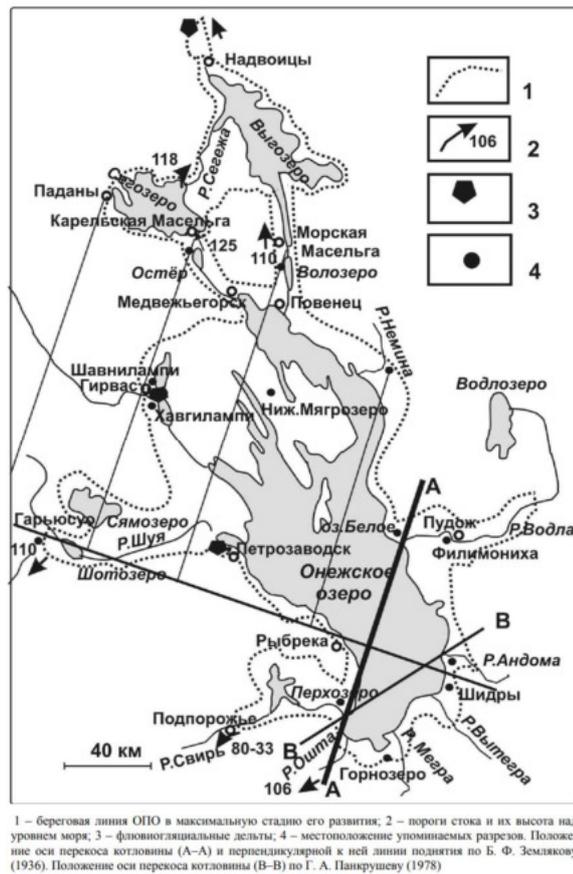


Рис.7 Схема максимальной стадии развития Онежского приледникового озера и положения линии гляциоизостатического равновесия (оси перегиба котловины) по данным И.Н. Демидова (Демидов, 2006).

Однако набор данных, по которым производилось построение подобных моделей, достаточно редкий, и может быть дополнен новыми исследованиями. Особенный интерес представляют площадные геолого-геофизические исследования на акватории озера, как в открытой его части, так и в отдельных заливах, так как подобного рода работ практически не проводилось. Площадная геофизическая съемка позволила бы, во-первых, получить большой массив данных об основных чертах строения района исследования, во-вторых, – связать между собой редкие точки геологического опробования. Полученная сеть профилей, в свою очередь, могла бы служить основой для построения карт четвертичных отложений и для восстановления истории развития Онежского озера в целом.

В Онежском озере до настоящего времени сейсмоакустические работы проводились крайне редко. В 2002 году в ФГУП НПП «Полярная МГРЭ» провела непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) по сети редких профилей в рамках геолого-съемочных работ масштаба 1: 500 000 в южной части акватории Онежского озера (Шаров и др. 2019; Максимов и др., 2015; Макарьев и др., 2011; Макарьев, 2002). Также сейсмоакустическое профилирование для выбора постановки скважин в северной части озера в начале века провели финские исследователи (Saarnisto, Saarinen, 2001).

Таким образом, к началу полевых работ в рамках данного исследования акваторию Онежского озера пересекали лишь единичные сейсмоакустические профили, которые были выполнены в последнем десятилетии прошлого века (Рис.8). Материалы не обрабатывались систематически, и публикации по результатам экспедиций отсутствуют. По опубликованным единичным иллюстрациям сеймопрофилей (Макарьев, 2001) можно судить лишь о региональных структурах, которые встречаются в Онежском озере. Например, в соответствии с новым изданием геологической карты дочетвертичных отложений (Максимов, 2015), было выдвинуто предположение, что на новых сейсмоакустических данных удастся увидеть крупные разломы, которые могут быть распространены в районе работ (Бискэ и др., 1971).

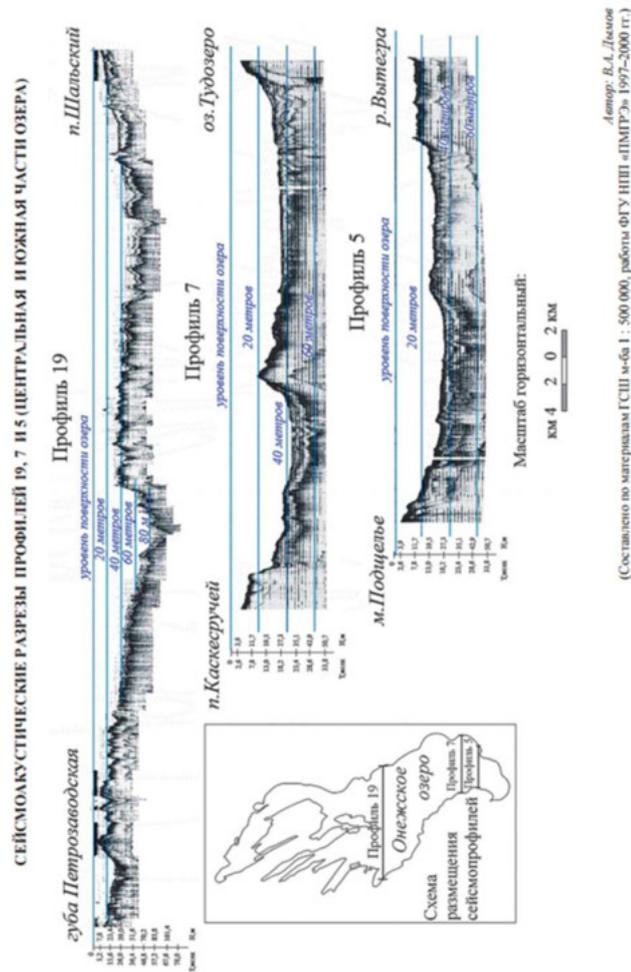


Рис.8 Сейсмоакустические профили, снятые через Онежское озеро в 1997-2000 гг (Макарьев, 2001).

В 2016-2018 гг в рамках Программы на полигоне «Петрозаводская губа» были проведены комплексные геолого-геофизические работы, в которых принимал участие автор (Алёшин и др., 2018). В ходе этих работ было подтверждено наличие газа в донных осадках, в том числе, обнаружены покмарки, что будет показано далее в тексте работы.

Согласно определению, данному в «Словаре по геотехнике» (С.Г. Сомервилл, М.Г. Пауль, 1986), покмарки («rockmarks») – это «мелкие конусообразные понижения, встречающиеся в

мягкие неконсолидированные отложения на морском дне... полагают, что они вызваны разрушением заполненных газом локализованных полостей». Это определение в значительной степени устарело, так как в настоящее время известны покмарки диаметром более 1 км, и кроме морей, покмарки обнаружены на дне эстуариев крупных рек, горных и равнинных озер (Cukur et al., 2013; Wessels et al., 2010; Judd, Novland, 2007; Watzin et al., 2002). Зарубежные специалисты отмечают, что образование озерных и морских покмарков, связано с выходом (выбросом) метана из осадка в водную толщу. Принято считать, что поля покмарков, наряду с другими видами газопроявлений (грязевые вулканы, дома (бугры) и др.), могут являться поисковым признаком на углеводороды.

Как показали исследования в озерах Ван, Баденском, Мичиган, Шамплейн и др. (Bücker M., et al 2017; Cukur D., 2013; Greenwood S. L., et al, 2015; Naflidason H., et al, 2019), диаметр покмарков определяется в основном мощностью газонасыщенных отложений, и колеблется в широких пределах - от 3 до 500 м. В России покмарки в водоемах рассматриваемого типа обнаружены в Ладожском озере, озере Большое Яровое, Байкал, озерах п-ва Ямал (Лаверов и др., 2016; Крылов и др., 2015; Амантов, 2014). Отмечается, что покмарки в Ладожском озере (отнесенные авторами к структурам диапирового типа) выявлены в зонах предположительно более полного разреза ленточных глин с ярко выраженными тиксотропными свойствами. На сейсмических временных разрезах они отображаются в виде понижений рельефа дна озера диаметром около 10 – 20 м при глубине до 5 м (Рыбалко и др., 2021). Не было неожиданностью и обнаружение в ходе наших работ покмарков в Онежском озере, которое, по своему географическому положению, происхождению котловины и т. д. существенно не отличается от таковых, свойственных Ладожскому озеру.

Суммируя геолого-геофизическую изученность Онежского озера в целом, стоит сделать несколько выводов:

1. На момент начала работ в рамках данного исследования в акватории озера существовала очень редкая сеть геоморфологических, палеомагнитных, одноканальные сейсмоакустических и других данных, полученных преимущественно в 1980-1990 годы («Онежская ...», 2011).
2. Детальных работ по изучению четвертичных отложений озера не проводилось. При этом в пределах Петрозаводской губы отсутствовали как геофизические данные, так и результаты геологического пробоотбора.

3. Инженерно-геологические условия и особенности Онежского озера были исследованы мало и неравномерно.
4. Отсутствие современных съемок не позволяет уточнять ранее предложенные модели формирования и развития Онежского озера (Демидов, 2005), не говоря уже о переходе к ландшафтным исследованиям и решению экологических задач.

Таким образом возникли вполне оправданные предпосылки по необходимости дополнительных исследований акватории Петрозаводской губы.

Петрозаводская губа является крайне удобным полигоном для продолжения исследовательской деятельности на акватории Онежского озера: она слабо изучена геологическими и геофизическими методами, при этом обладает удобными сейсмогеологическими условиями (малые глубины, пресная вода, малые мощности осадков), а также крайне удобно расположена с точки зрения логистики для организации полевых работ.

Проведение комплексных площадных геолого-геофизических исследований с многоканальной аппаратурой на данном полигоне с участием автора позволит, во-первых, расширить понимание истории развития озера и дополнить существующие геологические модели, а также выработать оптимальную методику комплексных геолого-геофизических исследований на мелководных пресноводных акваториях, что может быть в дальнейшем использовано для изучения Онежского озера, в частности для подготовки дальнейших ландшафтных экологических и научных исследований.

Глава 3. Полевые исследования

Новый этап в изучении четвертичной геологии Онежского озера начался в 2015 году в рамках комплексного исследования Онежского озера, а также программы изучения неоплейстоцена-голоцена восточной окраины Балтийского щита. В качестве полигона для новых геолого-геофизических исследований Онежского озера была выбрана Петрозаводская губа. Как было описано в предыдущих главах полигон был мало исследован и наиболее удобен с точки зрения логистики: проведения геофизических измерений с научно-исследовательски судов, Последний фактор играл важную роль, так как съемка производилась в несколько этапов.

Целью экспедиций являлось как изучение строения и свойств четвертичных осадков, слагающих осадочный чехол озера, так и подбор наиболее оптимальной методики съемки для дальнейшего расширения участка исследования. В ходе геолого-геофизических изысканий 2015-2016 года обнаружено и доказано существование газонасыщенных осадков (Алёшин и др., 2021). Также по результатам работ в Петрозаводской губе были успешно проведены съемки в других частях озера (Алёшин, 2021).

Отсутствие данных сейсмоакустической съемки в Петрозаводской губе предопределило использование геолого-геофизического комплекса, включающего в себя многоканальные мультислотные сейсмоакустические, гидроакустические методы, электроразведку и инженерно-геологические методы исследований. В рамках написания данной работы использовались данные, полученные с участием автора, в ходе полевых исследований на акватории Онежского озера за 2016-2019 года. В этот период исследования были проведены комплексом методов:

- Гидролокация бокового обзора (ГЛБО)
- Акустическое профилирование (АПр)
- Сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР) с приповерхностной приемно-излучающей системой
- ССВР с заглубленной приемно-излучающей системой
- Донная электротомография, непрерывное акваторное зондирование (НАЗ) и зондирования методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ)
- Геологический пробоотбор и инженерное бурение со льда
- Лабораторные исследования керна

3.1 Геофизическая аппаратура и программное обеспечение, использовавшиеся в ходе полевых исследований.

В этом разделе представлен аппаратный геофизический комплекс, использовавшийся при выполнении полевых испытаний на Онежском озере. Работы выполнялись в несколько полевых этапов и выездов, в каждый из которых применялся свой список измерительных приборов и систем наблюдений для проведения съемки методами гидроакустики, сейсмоакустики, электроразведки и геологического пробоотбора.

Сейсмоакустический аппаратный комплекс состоит из следующих основных элементов: излучатель, накопитель энергии, приемное устройство, блок синхронизации и сейсмостанция. Геофизические данные визуализируются и сохраняются на персональном компьютере (Рисунок 9).

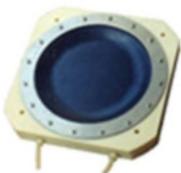


Рисунок 9. Схема сейсмического канала, использовавшегося для проведения полевых испытаний.

Сейсмоакустический комплекс можно разделить на приемную и излучающую системы. Излучающая система состояла из накопителя энергии до 2.5 кДж и излучателя на кабеле длиной до 50 м. Приемная система представляла собой одну или несколько маслonaполненных сейсмокос, сейсмостанций и ПК сбора данных.

При проведении исследований четвертичных отложений на акватории Онежского озера были опробованы различные типы и модели излучателей: бумер, спаркер в пресноводных контейнерах разной конструкции и с разным количеством электродов (Таблица 1).

Таблица 1 Сейсмоакустические излучатели, использовавшиеся на полевом этапе работ

Название	Фото	Описание
Электродинамический излучатель Applied Acoustics		Тип: электродинамический Частота излучения 1.5-2 кГц Входящая мощность 50-300 Дж
Электродинамический излучатель		Тип: электродинамический Частота излучения: 1-2 кГц
Пресноводный излучатель		Тип: электроискровой Количество электродов: 100 Наполнитель: подсолонная вода Частота излучения: 0.5 - 2.5 кГц
Пресноводный излучатель GeoDevice		Тип: электроискровой Количество электродов: 2x50 шт Частота излучения: 0.3-1.5 кГц
Пресноводный излучатель		Тип: электроискровой Количество электродов: 100 шт Частота излучения: 0.5-2.5 кГц

Электроискровые излучатели в пресноводном контейнере использовались для получения сведений о наиболее глубоких акустических горизонтах. Большое количество электродов позволяет подавать большое количество энергии (500 Дж и более) на излучатель, при этом сохраняя необходимый для формирования желаемого импульса объем энергии на электрод. Это позволило получить достаточную глубину для решения задачи картирования кровли моренных отложений и акустического фундамента.

Электродинамические излучатели в силу своей конструкции не позволяют работать на высоких энергиях. Использованные модели бумера предполагают работу на энергиях не выше

350 Дж. Однако при этом формируемый импульс обладает значительно меньшей шириной импульса, чем у электроискрового источника. Это делает его более выгодным при проведении детальных исследований четвертичных отложений.

Исходя из того, какой излучатель использовался, производился выбор накопителя энергии (Таблица 2). При работе с электроискровыми излучателями использовались приборы, позволяющие работать на энергиях больше 500 Дж. При работе с электродинамическими – менее мощные.

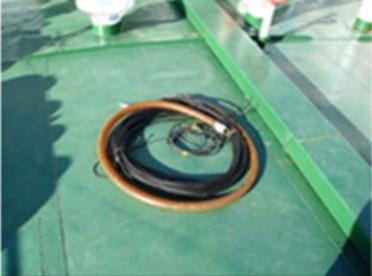
Таблица 2. Накопители энергии, использовавшиеся при выполнении работ на Онежском озере.

Название	Фото	Описание
Applied Acoustics CSP-P		Рабочее напряжение – 2,5 – 4,9 кВ Накапливаемая энергия – 50 - 2400 Дж Потребляемая мощность – до 3 кВт Скорость зарядки – 1500 Дж/сек Входное напряжение – ~200-240 В (50 Гц)
Jack-2500		Рабочее напряжение – до 4.8 кВ Накапливаемая энергия – 100- 5000 Дж Потребляемая мощность – 0,8 – 3,5 кВт Скорость зарядки – 900 Дж/сек Входное напряжение – ~200-240 В (50 Гц)
SES 900		- максимальное напряжение заряда конденсаторов – 6 кВ; - емкость накопительных конденсаторов – 60 мкФ; - тип разрядника – тиристорный; - напряжение питания - 220 В, 50 Гц; - потребляемая мощность – 3 кВт;

Комплект регистрирующей аппаратуры выбирался исходя из геологической задачи – получение сведений о структуре и свойствах четвертичных отложений Онежского озера. Для проведения рекогносцировки и предварительного анализа данных использовалась одноканальная сейсмокоса. Однако для последующей обработки и интерпретации сейсмоакустических материалов применялись многоканальные антенны (Таблица 3). Длина

активной секции в разные годы менялась от 32 до 48 метров, что позволило в дальнейшем провести скоростной анализ для верхней части разреза.

Таблица 3 Сейсмокосы, использовавшиеся для регистрации данных на полевом этапе работ

Название	Фото	Описание
Сейсмокоса Spectra Geo		Количество каналов – 16 Количество датчиков в группе – 1 Шаг между каналами – 2 м, Тип гидрофона – SQ-05 Чувствительность – 6.3 В/бар, АЦП – 14 бит Длина косы – 32 метра
Сейсмокоса одноканальная		тип сейсмокосы: маслонаполненная; диаметр сейсмокосы: 40 мм; распределение чувствительности: прямоугольное; количество датчиков давления: 14 шт. на базе 2.8м.
Сейсмокоса 16-канальная		тип сейсмокосы - маслонаполненная; длина косы: 35 м модель приемников AQ-2000 количество каналов: 16 расстояние между каналами: 2 м
Сейсмокоса SplitMultiSeis 24		- тип сейсмокосы - маслонаполненная; - длина косы: 50 м - модель приемников AQ-2000 - количество каналов: 24 - расстояние между каналами: 2 м

Выбор сейсмостанции зависел преимущественно от того, какая именно сейсмокоса использовалась. Предпочтение отдавалось приборам, оснащенным 24-битным АЦП для получения более качественного сигнала. Однако, не для всех приемных антенн были доступны соответствующие модели приборов (Таблица 4). Некоторые из использованных сейсмостанций обладали также встроенным генератором импульса синхронизации. В случае отсутствия таковых, использовался внешний блок синхронизации.

Таблица 4 Сейсмостанции, использовавшиеся для оцифровки данных

Название	Фото	Описание
Блок аналоговой обработки сигнала		<p>коэффициент усиления: 10^4;</p> <p>фильтры высокой частоты (ФВЧ) 60, 100, 120, 150, 200, 250 Гц;</p> <p>фильтры низкой частоты (ФНЧ) 1200, 2000, 4000, 6000, 10000 Гц;</p> <p>частота импульса запуска таймера – от 0.5с до 10с (с шагом 0.5с).</p> <p>разрядность аналого-цифрового преобразователя 14 бит;</p> <p>максимальная частота дискретизации, приведенная к одному каналу 250 кГц;</p>
		<p>Количество каналов – 16</p> <p>Частотный диапазон 20-6000 Гц</p> <p>Динамический диапазон 80 Дб</p> <p>Уровень шума на выходе 0.5 мкВ</p> <p>АЦП – 14 бит</p>
SpectraGeo SDAS 16-3		<p>Количество каналов 16</p> <p>Подключение к компьютеру USB</p> <p>Частотный диапазон 20-6000 Гц</p> <p>Динамический диапазон 80 Дб</p> <p>Уровень шума на выходе 0.5 мкВ</p> <p>Питание 220 В</p> <p>АЦП L-Card E-440</p>

Отдельно необходимо отметить, что для проведения работ, включающих в себя различные модели аппаратуры, часто меняющуюся методику и необходимость контроля качества данных в режиме реального времени требуется современная система сбора данных. До начала описываемых полевых работ автор принимал участие в разработке такой системы - программы SborEx («Свидетельство о государственной...», 2016, Рисунок 10).



Рисунок 10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "SborEx".

Программа предназначена для сбора и визуализации сейсмоакустических данных. Она позволяет использовать различные приемные модули и производить контроль качества данных в реальном времени. В ходе полевых работ 2015-2019 гг производилось тестирование и отладка этой системы. На момент написания данной работы программа прошла всесторонние испытания и нашла широкое применение при проведении 2Д и 3Д инженерных сейсмоакустических съемок компанией ООО «Сплит» и др. Использование этого программного обеспечения позволило ускорить процесс съемки, производить экспресс-интерпретацию на борту, а также дало возможность оперативно назначать точки для геологического пробоотбора.

Гидроакустическая аппаратура использовалась для получения высокоразрешающих данных о строении верхних 15 м геологического разреза, а также позволила с высокой детальностью и достоверностью провести идентификацию объектов на дне исследуемой акватории. Гидроакустический комплекс включает в себя акустический профилограф и гидролокатор бокового обзора.

Для выполнения исследований Петрозаводской губы использовался параметрический профилограф SES 2000 Light. В отличие от представленных выше сейсмоакустических источников, принцип его действия основан на пьезокерамическом эффекте для формирования желаемого сигнала. Высокая частота позволила детально рассмотреть все надморенные отложения и проследить кровлю ледниковых осадков.

Таблица 5 Акустический профилограф с приемно-излучающей антенной

Название	Фото	Описание
SES 2000 Light		<p>Первичная частота 100 кГц</p> <p>Разностные частоты: 5/6/8/10/12/15 кГц</p> <p>Ши</p> <p>Длина импульса 66 - 500 мкс</p> <p>Максимальный интервал излучения 30 Гц</p>

Для получения сведений о строении донных отложений, а также для идентификации объектов на дне Петрозаводской губы использовались гидролокаторы бокового обзора Star Fish и Klein (Таблица 6). Первый применялся в ходе рекогносцировки, т.к. обладает малым размером и весом, что делает его удобным для проведения подобных работ. Площадная съемка же осуществлялась вторым гидролокатором, позволяющим получить данные с лучшим разрешением и более четкой динамикой.

Таблица 6 Гидролокаторы бокового обзора, использовавшиеся на полевом этапе работ

Название	Фото	Описание
StarFish 450F		<p>Размер 378x110x97 мм</p> <p>Вес 2 кг</p> <p>Корпус Полиуретан черный</p> <p>Кабель 20 м, усилие на разрыв 150 кг</p> <p>Частота 450 кГц</p> <p>Длина посылки 400 мкс</p> <p>Наклонная дальность 200 м (100м на каждую антенну)</p>
Klein 3900		<p>Рабочие частоты – 445/900 кГц,</p> <p>Глубина погружения – до 200 м,</p> <p>Размеры – длина 1.22 м, диаметр 8,9 см,</p> <p>Вес – 29 кг,</p> <p>Электропитание – 120/240 VAC,</p>

	Длительность импульса – 25-400 мкс, Изменение угла наклона антенн – 5/10/15/20/25°
--	--

Геологический пробоотбор осуществлялся с помощью гравитационной трубки с борта судна в дрейфе. Труба была снабжена кернорвателем лепесткового типа, который препятствовал вымыванию грунта во время подъема на палубу (Таблица 7). Выбор точек пробоотбора происходил в ходе экспресс-интерпретации гидроакустических и сейсмоакустических данных.

Таблица 7 Комплекс оборудования для отбора и исследования керна и лабораторных исследований керна

Название	Фото	Описание
Пробоотборник гравитационного типа		ТГ-4.5 (верхняя и нижняя секции). Диаметр внутренний - 10.2мм Длина 1.5-4.5м Вес 200-800кг
Пробоотборник гравитационного типа		Кернорватель лепесткового типа (металл – нержавеющая сталь)

Пробоотборник гравитационного типа		Гравитационная трубка ТГ-4.5 в сборе, с грузом, на палубе
Термометр WF		Измерение температуры керна эл\механическим термометром WF Диапазон -10 ÷ +40°C

Аппаратура для электромагнитной съемки. Для проведения донной электротомографии использовался комплект, состоящий из генератора напряжения, измерительной станции и донных кос (Таблица 8). Электропитание осуществлялось благодаря 12 В аккумуляторам. Длина активной части косы выбиралась исходя из целевой глубинности исследований и составила 265 м. Шаг между электродами - 5 м.

Таблица 8 Комплекс электроразведочной аппаратуры

Название	Фото	Описание
Syscal Pro (IRIS Instruments, Франция)		Ток на выходе: До 2,5 А Напряжение на выходе: До 1000 В Мощность: 250 Вт Скважность: 0,2/0,25/0,5/1/2/4/8 с

		<p>Точность измерений тока: 0,2%</p> <p>Входное сопротивление: 100 МОм</p> <p>Макс. Напряжение на входе канала 1: 15 В</p> <p>Макс. Напряжение на входе каналов 2 — 10: 10 В</p> <p>Фильтр промышленных помех: 5/6 Гц</p> <p>Точность измерений напряжения: 0,2 %</p> <p>Разрешение измерений напряжения: 0,000 001 В</p>
<p>Электроразведочный генератор «АСТРА-100»</p>		<p>Максимальная выходная мощность: 100 Вт</p> <p>Максимальное выходное напряжение: 250 В</p> <p>Форма выходного тока: «меандр»</p> <p>Рабочие частоты: 0.076-2500 Гц</p> <p>Напряжение питания ~ 12 В</p>

Для обеспечения точного позиционирования использовались различные модели навигационных приборов (Таблица 9). Антенна устройства жестко крепилась на верхней палубе судна вдали от других антенн. Регистрация навигационных данных происходила на отдельном ПК, а также происходила передача координат в режиме реального времени для всех геофизических систем.

Таблица 9 Навигационное обеспечение полевых работ

Название	Фото	Описание
Trimble R7		<p>Число приемных каналов – 70,</p> <p>Спутниковые системы – GNSS(GPS + ГЛОНАСС) L1/L2/L2a/L5,</p>
Trimble R9		<p>Два чипа Trimble Maxwell 6 для 440 каналов</p> <p>Одновременно отслеживаемые сигналы спутников:</p>

		<ul style="list-style-type: none"> – GPS: L1 C/A, L2C, L2E (Технология Trimble отслеживания не кодированного сигнала L2P), L5 – ГЛОНАСС: L1 C/A и не кодированный P код, L2 C/A и не кодированный P код, L3 CDMA – Galileo: L1 CBOC, E5A, E5B и E5AltBOC – Beidou (COMPASS): B1, B2
Globalsat BU-353s4		<p>Точность определения скорости 0.1 м/с</p> <p>Частота обновления 1 раз/с</p>

После извлечения кернов происходили лабораторные измерения как на борту судна, так и в стационарных условиях. Измерялись электрические и акустические характеристики отобранных осадков. Комплект аппаратуры для проведения лабораторных исследований приведен ниже (Таблица 10).

Таблица 10 Сейсмоакустические и электроразведочные приборы для лабораторных исследований

Название	Фото	Описание
Электрические измерения		<ul style="list-style-type: none"> • Электроразведочный генератор «АСТРА-100» • Измеритель «МЭРИ-24» • Электроды • Соединительные провода • Аккумулятор
Ультразвуковые измерения		<ul style="list-style-type: none"> • Генератор тока • Осциллограф «Актаком АСК-3116» • Ультразвуковые датчики: пьезоприемник и пьезоисточник • Аккумулятор

Таким образом, был сформирован комплект аппаратуры для осуществления исследований верхней части разреза Петрозаводской губы Онежского озера. На разных этапах съемки указанная аппаратура применялась в различных комплектациях в зависимости от решаемой задачи. Использованный комплекс отлично зарекомендовал себя в ходе проведения полевых исследований четвертичных осадков Петрозаводской губы Онежского озера.

3.2 Методика проведения полевых и лабораторных исследований

3.2.1 Общие сведения.

Для проведения полевых работ была выбрана сеть геофизических профилей (Рис.11). Расстояние между профилями, их длина и азимут выбирались индивидуально для разных методов исследования, так как они обладают разной глубиной и детальностью. Сеть профилей ССВР является наиболее редкой и имеет шаг между продольными профилями 600 м и азимут 312 градусов. Направление выбиралось таким образом, чтобы обеспечить максимальное покрытие Петрозаводской губы без изменения хода движения судна. Для последующей увязки данных были заложены 3 поперечных профиля. Итоговый размер полигона составил 4.6 на 12 км.

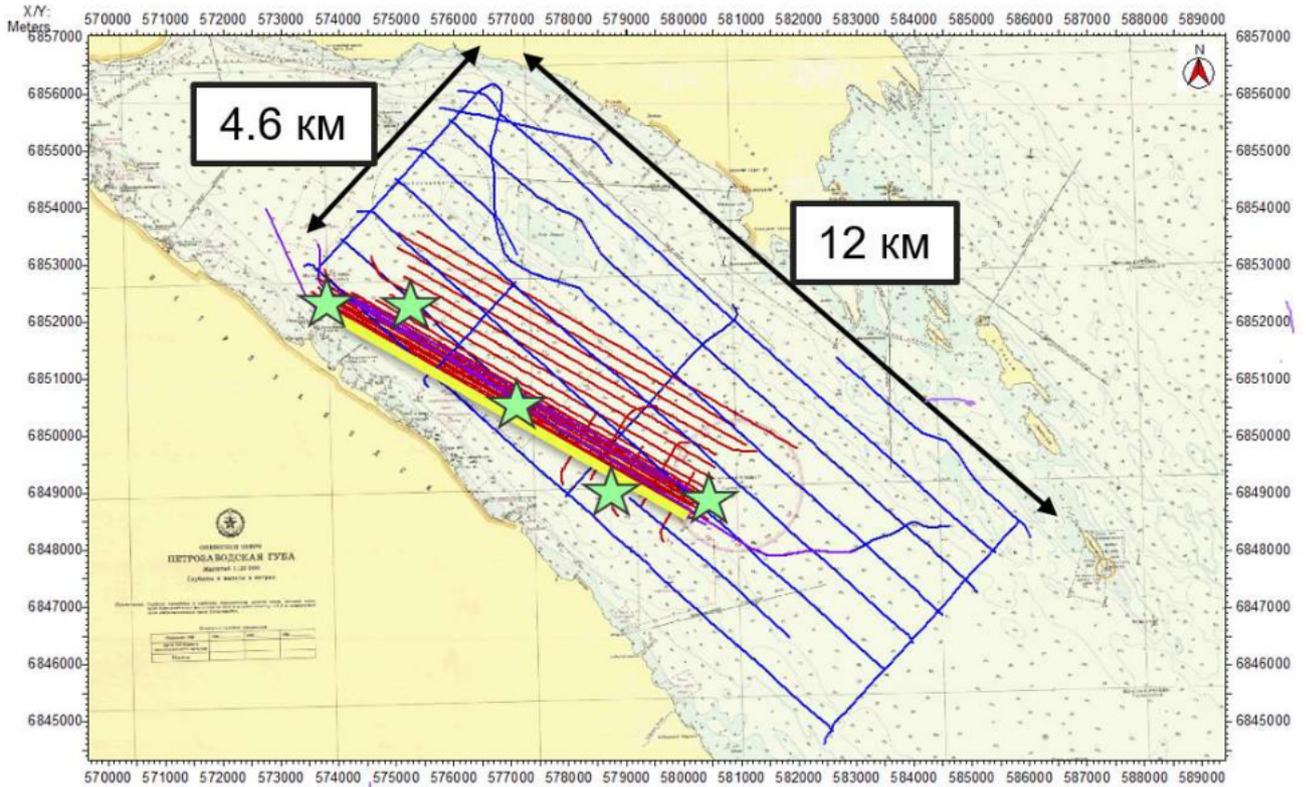


Рис.11 Карта фактического геолого-геофизического материала полевых исследований 2016-2021 гг на акватории Петрозаводской губы (синим цветом показаны профили ССВР со спаркером, красным – ССВР с бумером, АПр и ГЛБО, желтым – электротомография, зеленые звезды – станции геологического пробоотбора и инженерного бурения).

Для проведения более детальной съемки высокочастотными методами (СУВР, АПр, ГЛБО), нацеленной на изучение поверхности дна и верхней части разреза, в центральной части полигона был выбран участок размером 2 на 6 км. Положение участка выбиралось исходя из наибольшей изменчивости волновой картины. Там наблюдались признаки газонасыщенности в осадках, места наиболее интенсивного осадконакопления, а также прослеживались все сейсмокомплексы, представленные в разрезе.

Расстояние между профилями СУВР и АПр на малом участке Петрозаводской губы было выбрано равным 200 м, с последующим сгущением до 60 м для обеспечения полного покрытия данными ГЛБО в южной части. Съемка ГЛБО проводилась в южной части полигона, т.к. там наблюдалась наиболее высокая изменчивость обратного рассеяния на протяжении профиля, при этом присутствовали техногенные объекты, зоны смены литологического типа осадков и покмарки.

Электромагнитная съемка проводилась после проведения сейсмоакустических исследований. Наибольшей интерес представляли участки с потерей корреляции на сейсмоакустических данных, а также зоны смены литологического состава осадков в верхней части разреза.

По результатам предварительной набортной интерпретации намечались точки геологического пробоотбора. Пробоотбор проходил отдельно, после завершения геофизической съемки. Точки выбирались таким образом, чтобы отобрать образцы из всех комплексов, представленных в верхней части разреза. Отдельный интерес представляли места с признаками газонасыщенности на данных сейсмоакустики.

Отобранные образцы доставлялись в лабораторию, в которой производились измерения физических свойств пород, слагающих осадочный чехол Петрозаводской губы Онежского озера. Исследования проводились на закрытых трубках как на борту судна, так и в стационарных лабораториях.

На разных этапах полевых работ использовались различные научно-исследовательские суда, а именно НИС «Посейдон», НИС «Эколог» и НИС «Профессор Зенкевич» (Таблица 11). Съемка методом донной электротомографии производилась с борта моторной лодки.

Таблица 11 Наименования и фотографии флота, использовавшегося для проведения полевых испытаний в Петрозаводской губе

Название научно-исследовательского судна	Фотография судна
НИС «Посейдон»	

НИС «Эколог»

НИС «Профессор
Зенкевич»

Данные 2015 г. были получены с борта НИС «Эколог». Основной объем работ был запланирован на акватории Ладожского озера, однако ОМР производились на акватории Петрозаводской губы. На штанге по правому борту был закреплен гидролокатор бокового обзора StarFish, а в кормовой части на выдвигной 3 м штанге буксировались пресноводный электроискровой излучатель (100 электродов в контейнере), одноканальная и многоканальная сейсмокоды.

Данные 2016 г. были получены с борта НИС «Профессор Зенкевич», в качестве источника использовался электродинамический излучатель Applied Acoustics “Boomer”, регистрация

производилась с помощью 16-канальной косы «Split-Multi Seis». Забортные устройства буксировались приповерхностно на глубине оптимального согласования, равной 0.3 м.

Данные 2018 г. были получены с борта НИС «Эколог» КарНЦ РАН. В качестве источника использовался электроискровой излучатель спаркер в пресноводном контейнере. Излучатель был закреплен на плотике и буксировался по правому борту судна. Регистрация производилась с помощью 24-канальной косы «Split-Multi Seis», которая была закреплена оголовьем за плотик спаркера. Это позволило более стабильно соблюдать оптимальную глубину буксировки во время съемки. Однако в ходе проведения работ глубина буксировки со временем увеличилась из-за того, что плотик стал набирать воду и погружаться ниже, чем предполагает его конструкция. Волны-спутники, проявившиеся из-за этого на записи, в дальнейшем устранялись процедурами обработки.

Далее рассмотрим более детально методику проведения полевых работ для каждого из типов съемок: сейсмоакустической, гидроакустической, электромагнитной, а также для геологического пробоотбора и лабораторных исследований.

3.2.2 Сейсморазведка сверхвысокого разрешения с приповерхностной системой

Съемка методикой ССВР с приповерхностной системой проводилось при скорости движения судна 3-6.5 узла, в зависимости от технических возможностей судна и погодных условий на момент сбора данных. Перед началом съемки выполнялись опытно-методические работы (ОМР), в ходе которых проверялась работоспособность оборудования, а затем выбирались параметры наблюдений. ОМР проводились на акватории Петрозаводской губы и включали в себя следующие этапы:

- «Сухие» тесты оборудования, без выхода в акваторию;
- Установка базовой навигационной станции и калибровка навигационной системы;
- Выбор центральной частоты сигнала, интервала между выстрелами и параметров регистрации;
- Согласование глубины буксировки приемных и излучающих устройств;
- Выбор общей геометрии расстановки;
- Выбор параметров регистрации сейсмических станций;

Перед началом работ, по результатам опытно-методических исследований, было выбрано оптимальное расстояние между пунктами возбуждения. Возбуждение сигнала выбиралось таким образом, чтобы трассы записывались с шагом ПВ, равным 1,5 – 2,25 м. Приповерхностная коса буксировалась на глубине, согласованной с центральной частотой источника приповерхностного источника. Глубина буксировки была выбрана в ходе опытно-методических работ и находилась в пределах 0.5-1 м, в зависимости от частоты излучаемого сигнала.

3.2.3 Сейсморазведка сверхвысокого разрешения с заглубленной системой

Помимо сейсмоакустической съемки с приповерхностной приемно-излучающей системой были произведены работы с заглубленной системой. Одним из основных недостатков сейсмоакустического профилирования с поверхностно-согласованными системами является невысокая динамическая стабильность как излучаемого, так и принимаемого сигналов из-за влияния волнения поверхности воды и невозможность их контроля (Isaenkov et al., 2016). Этих искажающих факторов можно избежать, погружая приемно-излучающую расстановку на некоторую глубину. Как известно, при наблюдениях на акваториях, возбуждение и прием колебаний производятся в идеальной, с точки зрения стабильности, среде. Форма колебаний в источнике известна и постоянна в отличие от работ на суше. Кроме того, выбор энергии и глубины погружения источника позволяет формировать спектр возбуждаемых колебаний (Калинин и др., 1983).

Схема расположения устройств при работе с заглубленной расстановкой изображена ниже (Рис.12). С помощью обтекаемого груза, прикрепленного к концу металлического троса, расстановка, состоящая из излучателя (спаркера в контейнере) и пьезокосы погружается на глубину, превышающую требуемую глубинность по грунту (если она не превышает глубины дна в районе исследования).

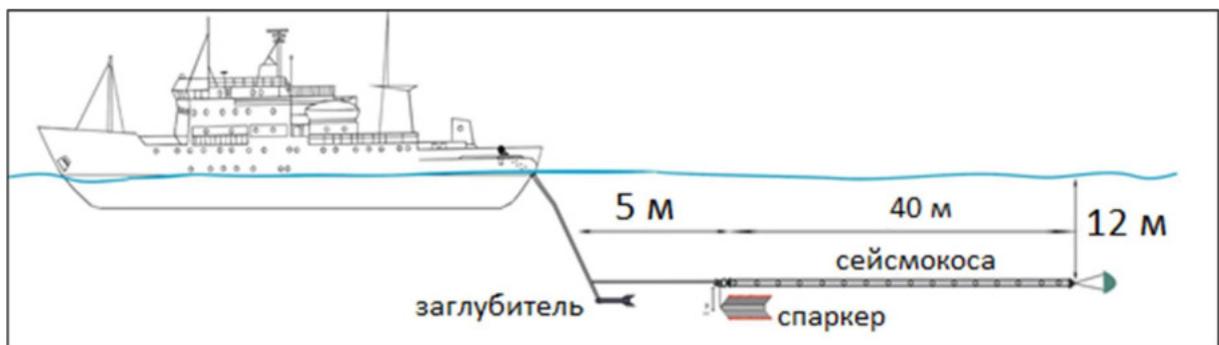


Рис.12 Схема наблюдений с положением приемно-излучающей расстановки при работе с заглубленной системой.

Волновая картина, получаемая при работах с данной методикой, существенно отличается от волновой картины, получаемой с методикой оптимального заглубления. Однократные отражения, являющиеся основным носителем интересующей информации о свойствах придонных осадков, оказываются хорошо отделенными по времени от волн-спутников и не подверженными влиянию поверхности вода-воздух (Рис.13, Рис.14).

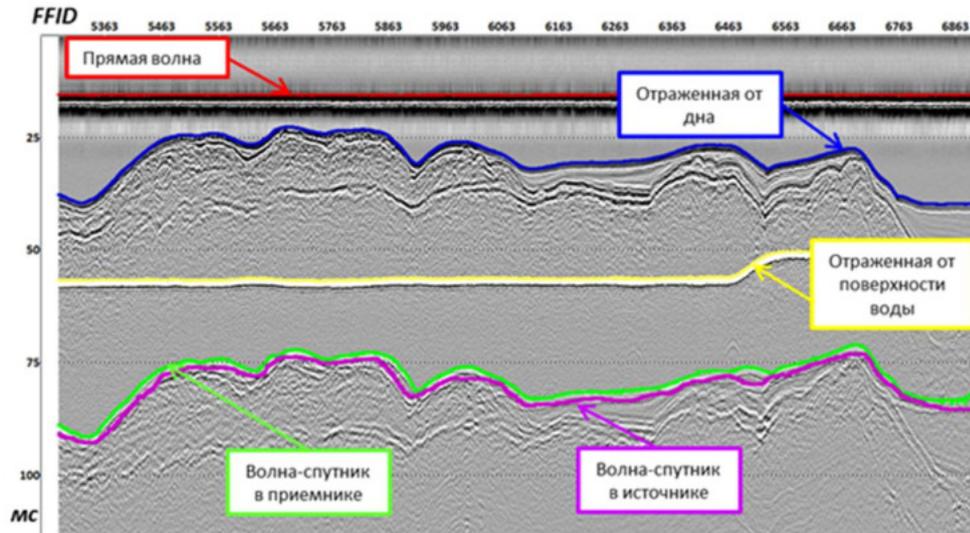


Рис.13 Пример сейсмической записи вдоль профиля, полученной методом ССВР с заглубленной приемно-излучающей установкой..

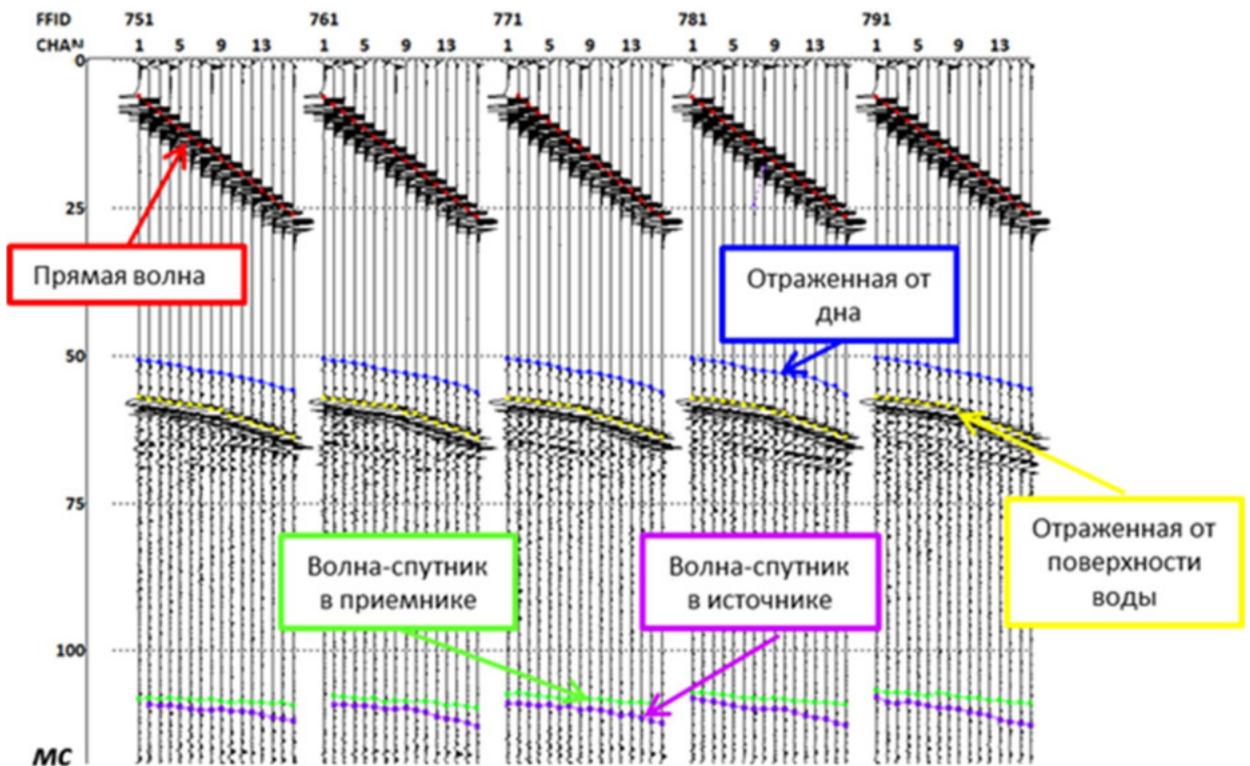


Рис.14 Изображение многоволновой картины на сейсмограммах ОПВ по одному из участков профиля.

Отражения от более глубоких границ интерферируют с волнами-спутниками. Однако применение современных способов обработки может позволить существенно ослабить такой фон помех, и сделать интерпретируемыми и эти интервалы временных разрезов, о чем пойдет речь в последующих главах.

Для обеспечения стабильности заглубления использовался обтекаемый металлический груз. Вся система буксировалась на стальном лебедочном тросе. Чтобы удерживать глубину всех каналов на одном уровне во время прохождения профиля, к концу канальной кос прикреплялся «тормоз» - парашют. При работе с судна «Посейдон» использовалась система из покрышек, позволявшая снизить рабочий ход судна с 7 узлов до 4-5 узлов, что было необходимо для достижения заглубления системы более чем на 7 м.

В качестве источника для заглубленной системы электроискровой излучатель «Спаркер» в контейнере. Источник позволял возбуждать сигнал с центральной частотой не менее 400 Гц. Для регистрации данных использовалась заглубленная многоканальная сейсмическая коса с шагом между приемными каналами, равным 2 м.

Регистрация данных осуществлялась при помощи двух 14 разрядной сеймостанции «SplitMultiSeis». Запись сигналов производилась с дискретностью не более 0.5 мс и продолжительностью записи не менее 200 мс, в формате SEG-D, а затем загружалась в проект обработки.

По завершении каждого профиля данные загружались в обрабатывающий комплекс на базе программного пакета RadExPro для проведения оперативного контроля качества и предварительной обработки полевых материалов.

3.2.4 Гидролокация бокового обзора

Съемка методикой ГЛБО проводилась с борта НИС «Профессор Зенкевич» при скорости движения судна 3-4 узла. Гидролокатор Klein буксировался с левого борта судна на поворотной штанге на расстоянии 3 м от борта. Это позволяло избежать воздействия кильватерной струи и шумов судна на прибор, а также избежать наводок от высоковольтной линии спаркера, расположенной ближе к правому борту. Альтитуда над дном выбиралась близкой к 1/5-1/10 от наклонной дальности. По результатам опытно-методических работ заглубление составило 5-7 метров. Величина наклонной дальности была равна 60 м. При таких параметрах съемки удавалось получить равномерное усиление на всей ширине записи, не опасаясь при этом за

сохранность прибора на мелководных участках и при выполнении разворотов. Расстояние между профилями было равно 60 м, что позволило получить более чем 100% перекрытие. Частота излучаемого сигнала составляла 445 кГц, тип сигнала: «chirp». Методика ГЛБО позволила получить площадные данные о строении осадков, наблюдаемых на дне в центральной части Петрозаводской губы (Рис.15).

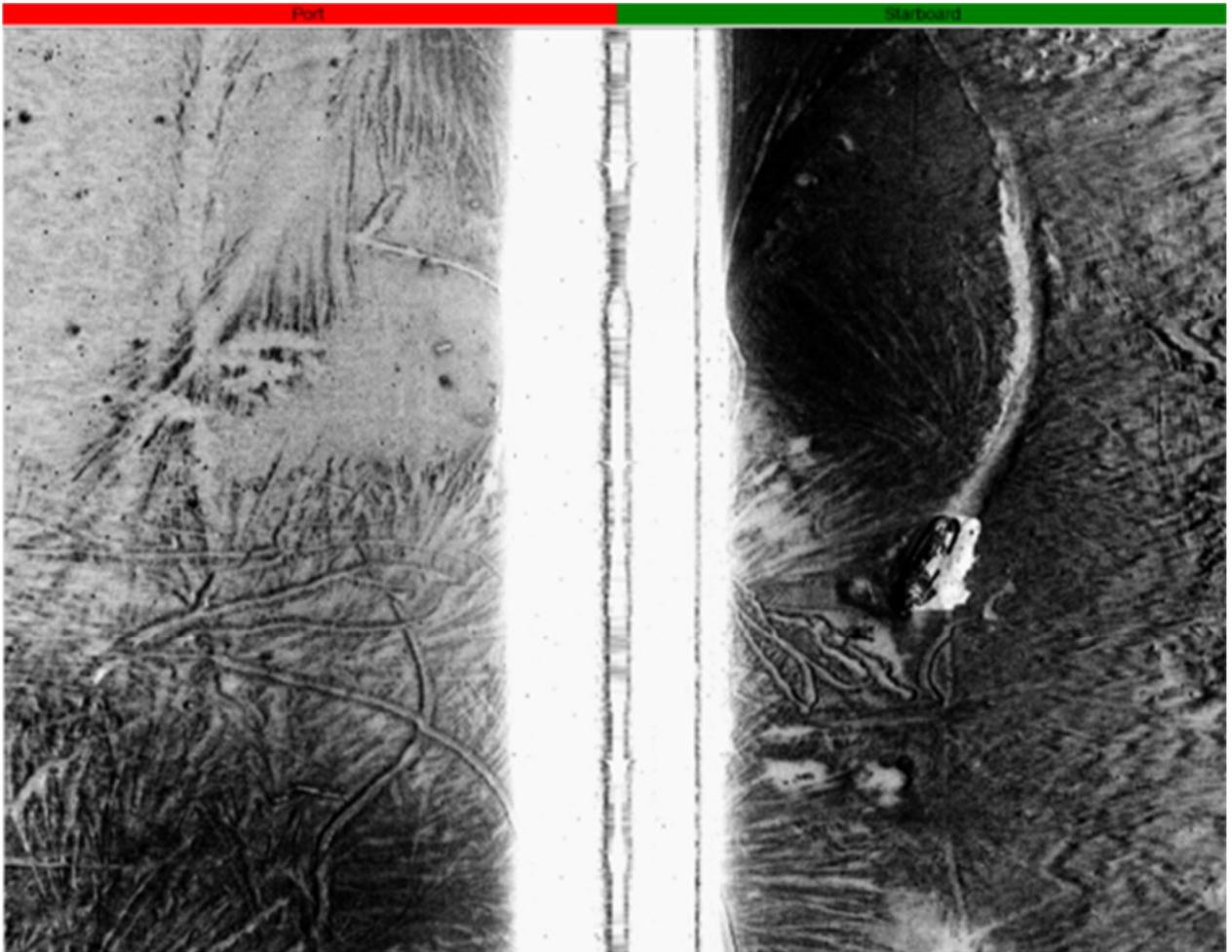


Рис.15 Пример данных ГЛБО, полученных на акватории Петрозаводской губы.

3.2.5 Акустическое профилирование

Съемка методикой АПр проводилась с борта НИС «Профессор Зенкевич» при скорости движения судна 3-4 узла. Прибор SESLight устанавливался на штангу и жестко крепился к правому борту с помощью обжимных скоб. Для более жесткого крепления антенны и во избежание ее вибрации при движении было предусмотрено три оттяжки. Оттяжки с одной стороны крепились на штанге вблизи антенны, с другой – на наваренные рым-болты на леерах судна. Подкилевая оттяжка была сделана из каната, чтобы не повредить деревянный корпус судна. Натяжением регулировалось положение штанги, чтобы обеспечить ее вертикальное

положение. Работы производились в закрытом участке озера в спокойную погоду, поэтому установки устройства для введения коррекции за качку не требовалось. Перед началом съемки выполнялись опытно-методические работы (ОМР), в ходе которых проверялась работоспособность оборудования, а затем выбирались параметры наблюдений. Для выполнения съемки была выбрана рабочая частота 10 кГц и длина записи 50 мс. Метод АПр позволил получить высокоразрешающие (до 10 см по вертикали) данные о строении первых 20 м разреза Петрозаводской губы (Рис.16).

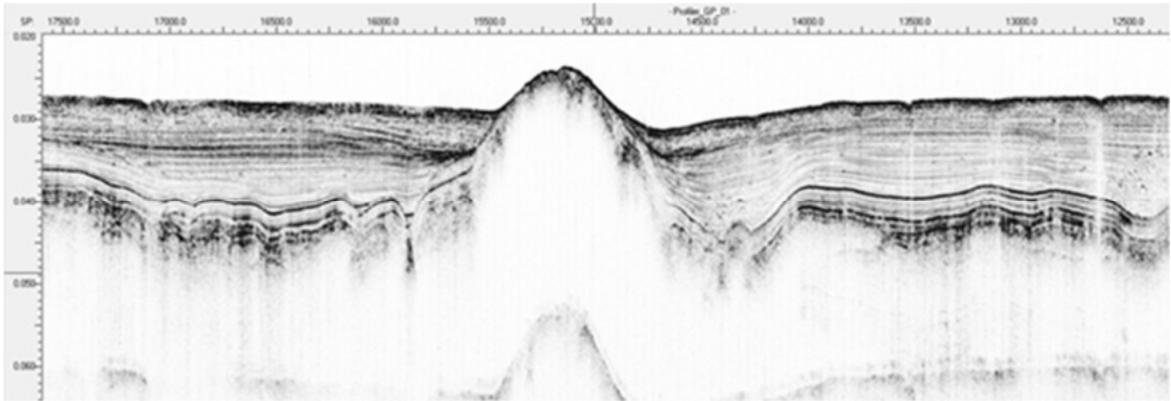


Рис.16. Профиль, полученный приповерхностной съемкой АПр. Глубинность – 20 м. Вертикальная разрешающая способность – 0.1 м.

3.2.6 Донная электротомография

Производилась с катера. По результатам съемки ССВР были отмечены точки для оптимальной установки донной косы (Рис. 18). Измерения проводились с использованием косы (ООО «Geodevice»), в которой каждый электрод является как приемным, так и питающим. В качестве измерительной станции использовалась 72- электродная 10-канальная аппаратура «SyscalProSwitch 72» производства компании «IRIS Instruments» (Франция). Перед выполнением полевых работ методом электротомографии были прописаны протоколы, для двух установок: дипольная осевая (АВМN) и Шлюмберже (АМNВ). В сумме выполнено 1259 измерений на каждой установке. Время пропускания тока составило 0.5 с, выходное напряжение генератора – 400 В, сила тока в линии АВ – 200-300 мА, измеряемый сигнал – более 3 мВ. Метод донной

электротомографии позволил впервые получить сведения о строении и электромагнитных свойствах четвертичных отложений до глубин 50 м.

3.2.7 Геологический пробоотбор

Пробоотбор выполнялся гравитационной трубкой ТГ-4.5 (Рис.17). Использовалась секционная гравитационная трубка с возможностью изменения длины керноприемной части от 1. до 4.5 м, в зависимости от характера разреза и ожидаемой глубины внедрения. При работе в Петрозаводской губе применялась 2-х секционная модификация с длиной керноприемной части 3 м. Максимальное внедрение трубки в грунт составило 3.3 м. Пробоотборник был снабжен кернорвателем и пластиковым вкладышем-гильзой. Извлечение керна осуществлялось посредством вытягивания пластиковой гильзы на палубе и ее дальнейшего разделения на части для дальнейших исследований и испытаний. Часть трубок сохранялась без извлечения из них керна для непосредственной герметизации и транспортировки в стационарные лаборатории.



Рис.17 Процедура спуско-подъемных работ с геологическим пробоотборником.

Пробоотбор осуществлялся несколько раз на одной станции. Судно находилось в дрейфе в безветренную погоду. При более сложных метеорологических условиях осуществлялся повторный заход на заданную точку отбора проб. Первая колонка отбиралась для литологического набортного анализ и отбора проб, вторая – для инженерно-геологических (геотехнических) целей, последующие – для отбора проб на различные виды анализов (физ-мех. свойства, химический состав, газовый анализ, томографию и пр.). При дальнейшей работе было принято, что при наличии нескольких кернов из одной точки разрезы по ним «сбивались». Хотя,

при дрейфе судна либо при повторном заходе, возможно смещение от плановой точки пробоотбора и некоторое отличие в разрезе колонок, погрешность составляла не более 5 м. Разницей в положении было решено пренебречь и использовать единое описание колонки для станции, описания повторно отобранных кернов не производились.

Впервые на Онежском озере было произведено инженерное бурение со льда. Использовалась буровая установка ударного типа. Бурение позволило отобрать керны из всех горизонтов, выделяемых по сейсмоакустическим данным. Всего на акватории Петрозаводской губы Онежского озера были отобраны керны в 11 точках, 9 из которых в 2016 году, оставшиеся – в 2019 году (Рис.18).

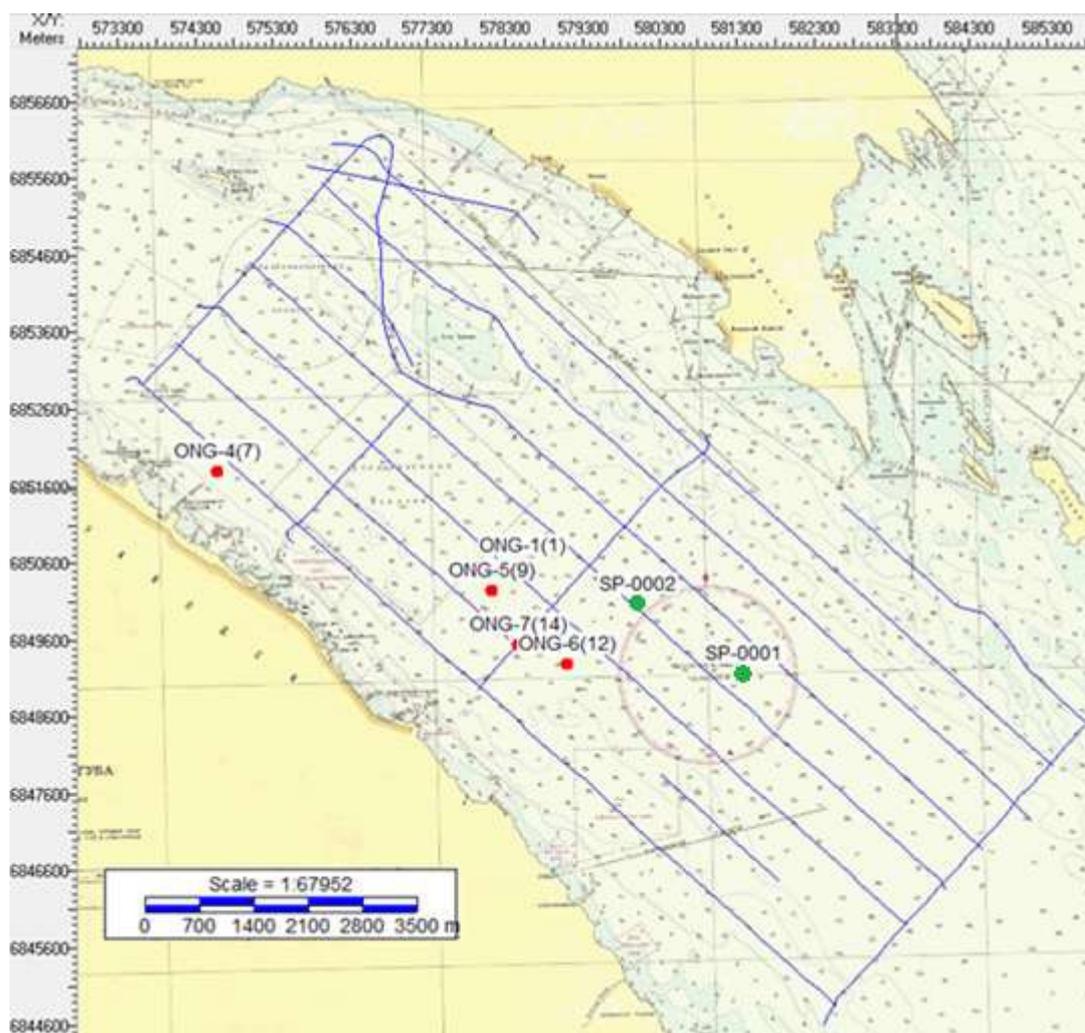


Рис.18 Схема расположения станций пробоотбора в Петрозаводской губе Онежского озера (Красным помечены точки отбора проб с гравитационной трубкой, зеленым - точки бурения со льда, синими линиями показаны профили съемки ССВР 2019 года).

3.2.8 Инженерное бурение со льда.

В 2019 году было проведено первое в истории бурение в Петрозаводской губе со льда при использовании ударного пробоотборника производства фирмы UWITEC (Рис.19). Пробоотборник оснащен камерами и источниками света, что позволяет получать информацию о процессе отбора проб в режиме реального времени. Конструкция пробоотборника дает возможность добывать керны осадочных пород длиной до 3,8 м.



Рис.19 Фотография рабочего процесса при бурении со льда в Петрозаводской губе Онежского озера.

В результате было получено 2 керна суммарной длиной до 11 м (Беляев, 2021). Методы геологического пробоотбора и бурения с льда позволили отобрать образцы осадков на акватории Онежского озера для последующей геологической интерпретации геолого-геофизических данных.

3.2.9 Лабораторные исследования керна

Непосредственно на борту судна после извлечения керна проводилось его описание, фотографирование и экспресс-тестирование (определение природной влажности, плотности, температуры, прочностных свойств при помощи микрокрылатки и микропенетromетра). Лабораторные методы исследования позволили детально (с шагом 5-10 см) изучить акустические и иные свойства образцов, отобранных в ходе геологического пробоотбора, а также проанализировать наличие и состав газа в осадке. Измерения выполнялись по методике прямого просвечивания. Излучатель и приемник располагались на противоположных сторонах трубки на оси диаметра трубки (Рис.20).

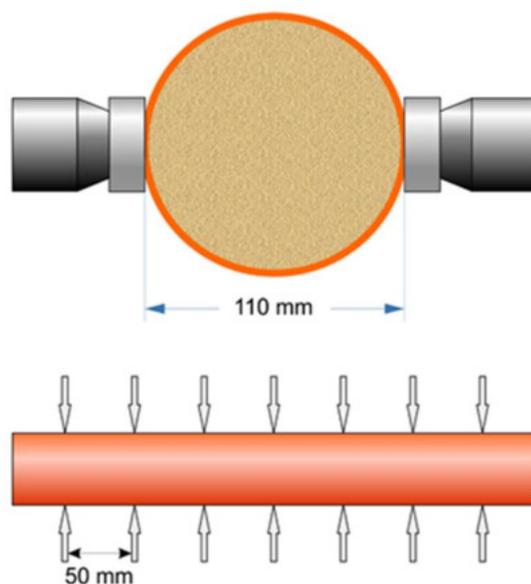


Рис.20 Расположение ультразвуковых датчиков на трубке с керном.

Вдоль трубки измерения выполнялись с шагом 0.05 м. Ориентирование датчиков не выполнялось. Для обеспечения надежного акустического контакта датчиков с трубкой применялась специальная смазка, выполненная на основе густого раствора сахаров, которая по окончании работ легко смывалась водой. Для увеличения соотношения сигнал/шум выполнялось осреднение 50-ти трасс при неподвижном положении датчиков.

Синхронизация осциллографа с генератором выполнялась через второй канал осциллографа – на него подавался электрический импульс, снятый с излучателя и прошедший через делитель напряжения. Фото процесса измерений представлено на рисунке ниже (Рис.21).



Рис.21 Фото процесса проведения измерений акустических свойств на трубке.

Перед началом непосредственных измерений на керне были проведены лабораторные методические тесты для выявления особенностей измерения данным комплектом аппаратуры. Особенностью оборудования, применяемого для выполнения настоящих работ, является возможность смещения начальной задержки по времени. Связано это может быть с различными факторами: особенностями работы электронной части генератора; конструкцией преобразователей. Для определения смещения нуля (задержки) была выработана определенная методика. Как правило, измеряемое время прихода волны $t_{P_изм}$ немного больше реального времени распространения волны в образце t_p . Измеренное время может быть выражено в виде:

$$t_{P_изм} = t_p + \Delta t, \text{ где } \Delta t - \text{ некая постоянная поправка (задержка).}$$

Для калибровки системы выполняется три измерения:

1. Производится просвечивание на образце №1 и определяется измеренное время прихода волны $t_{P_изм 1}$.
2. По аналогичной схеме производится определение $t_{P_изм 2}$ на другом образце.
3. Образцы №1 и №2 прижимаются друг к другу и измерения проводятся так, чтобы упругая волна прошла последовательно оба образца. Далее определяется измеренное время прихода продольной волны $t_{P_изм 1+2}$,
4. Поправку Δt рассчитывается по формуле:
$$\Delta t = t_{P_изм 1} + t_{P_изм 2} - t_{P_изм 1+2}.$$
5. Далее при всех измерениях эту поправку учитывают согласно выражению: $t_p = t_{P_изм} - \Delta t$.

В качестве образцов №1 и №2 могут использоваться любые образцы правильной формы (кубической или цилиндрической), состоящие из однородного изотропного материала. Так, в

работе использовались образцы из плексигласа из набора эталонных образцов дефектоскопа УК-10ПМС. Длина образца №1 – 50 мм, образца №2 – 100 мм. Величина поправки составила 1.0 мкс.

Для определения влияния ультразвуковой установки на реальные данные, были проведены параметрические измерения (Рис.22). Выявлялось влияние на величины времен прихода целевых волн и давалась оценка интерференционной картины, возникающей при измерениях на образцах разных сред (Рис.23).

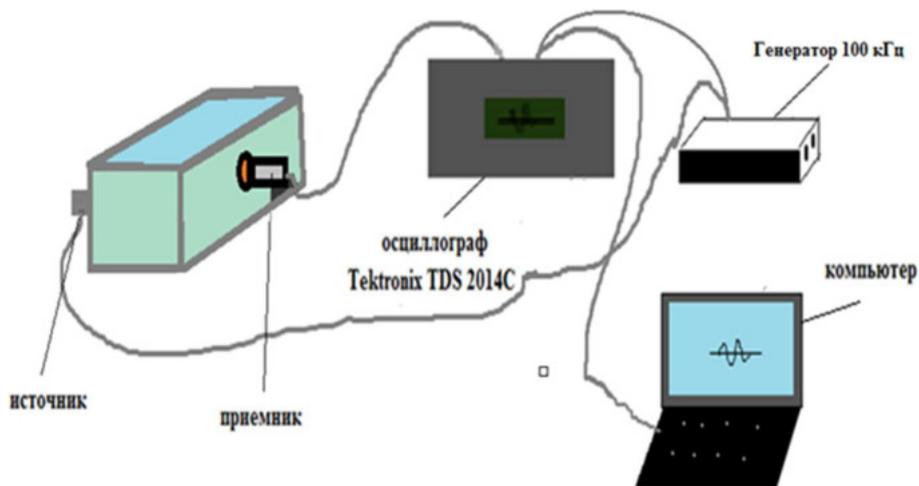


Рис.22 Схема варианта измерительной установки для измерений в осадках.

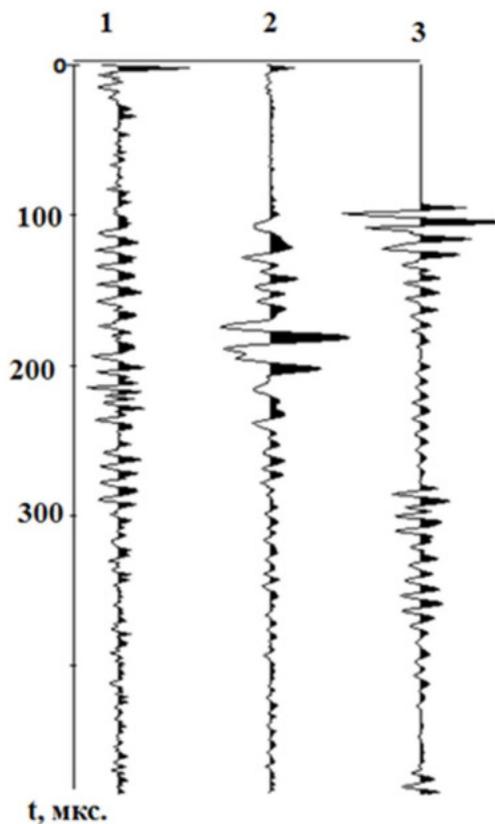


Рис.23. Волновые картины, полученные для трех сред: 1. Гидрофобный песок; 2. Гидрофильный песок; 3. Вода.

Для расстояния между источником и приемником 14,1 см получены следующие результаты (Рис.24):

	t_0 , мкс	V , м/с
Вода морская	92,2	1530
Песок гидрофобный	93,0	1520
Песок гидрофильный	98,2	1440

Рис.24 Результаты ультразвуковых измерений времени и скорости звука для трех сред.

В результате измерений выяснено, что ошибка не превышает 1,5% значений скорости распространения для воды, то есть точность измерений составляет примерно 22 м/с.

На последнем этапе методических тестов была проведена серия экспериментов на пластиковой трубке-вкладыше, использовавшейся в ходе геологического пробоотбора (Рис.25, Рис.26). Трубка заполнялась воздухом, водой и водонасыщенным песком.

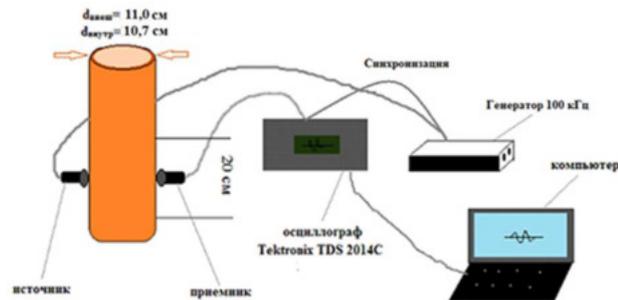


Рис.25 Установка для измерения скорости звука в осадках в пробоотборных трубках.

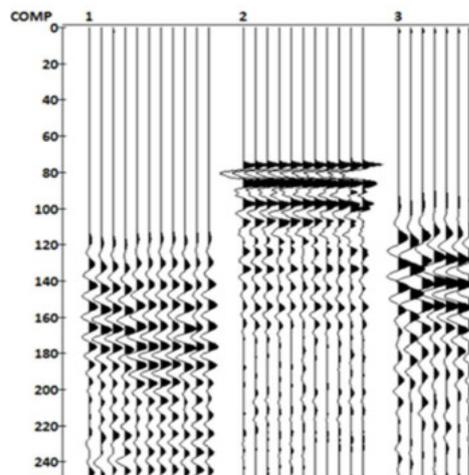


Рис.26 Волновые картины, зарегистрированные при заполнении трубки воздухом (1), водой (2) и водонасыщенным песком (3).

При заполнении трубки воздухом наблюдается приход изгибной волны на временах 115 мкс. В сравнении с приходами волн в воде и песке, эта волна более медленная и не интерферирует

с целевой продольной волной в заполняющей трубке осадке. Таким образом, в ходе методических тестов в лаборатории была дана оценка точности измерений, а также возможности применения такой ультразвуковой установки на кернах, полученных в ходе геологического пробоотбора.

Таким образом, в рамках подготовки к полевым исследованиям удалось оценить сейсмогеологические условия, характерные для Онежского озера. Исходя из этих условий был сформирован комплекс геолого-геофизических методов, позволивший решить задачу картирования четвертичных отложений, а также задачу изучения характеристик осадков. Хотя применение подобных комплексов в морских условиях достаточно широко используется в ходе выполнения инженерно-геофизических съемок, озерные условия накладывают значимые ограничения.

К таким особенностям условий использования предложенного аппаратно-программного комплекса относится малая глубина водоема (до 100 м), пресная вода, малая мощность осадочного чехла (до 100 м), высокая изменчивость геологического разреза как в плане, так и по глубине за счет специфической истории формирования и режима жизни озера, широкая распространенность ОГПЯ, отсутствия большого количества специализированных судов для выполнения изысканий. Представленный комплекс формировался непосредственно таким образом, чтобы, не взирая на перечисленные трудности, позволить получать высококачественные материалы для дальнейшей обоснованной геологической интерпретации данных, в частности, для обнаружения ОГПЯ.

Петрозаводская губа была выбрана в качестве полигона для исследований исходя из слабой изученности и доступности для проведения работ. Съемка выполнялась в несколько этапов в период времени с 2016 по 2019 г. За это время были опробованы различные методики съемки, осуществлен донный пробоотбор, впервые на акватории Петрозаводской губы было проведено инженерное бурение со льда, а также была разработана и протестирована программа сбора и контроля качества сейсмоакустических данных SborEx.

В результате проведенных полевых исследований на акватории Петрозаводской губы удалось перейти к подробному картированию четвертичных отложений. Полученные данные послужили основой для создания сейсмостратиграфических схем, схемы четвертичных отложений, геоморфологической схемы отложений в масштабе 1:1000000 (Беляев и др., 2021), а также карты геологических опасностей Петрозаводской губы Онежского озера. Опыт работы на полигоне в Петрозаводской губе использовался для проведения геолого-геофизической съемки в других частях озера (Алёшин и др., 2021). Проведенные исследования нашли отражение в коллективной монографии по Онежскому озеру (Субетто и др., 2022).

Вывод главы 3. Сформированный геолого-геофизический комплекс, включающий в себя сейсмоакустические, гидроакустические, электромагнитные, инженерно-геологические и лабораторные методы, позволил получить научно значимые материалы для детального расчленения толщи четвертичных отложений в пресноводных условиях Петрозаводской Онежского озера.

Глава 4. Обработка и анализ результатов полевых наблюдений

Целью обработки геофизических данных является полное устранение или подавление помех и шумов в записи, а также достижение глубинности (в случае сейсморазведки) и разрешающей способности геофизических наблюдений, достаточных для решения геологической задачи. В рамках этой главы приводится описание графа обработки по каждому из геофизических методов, а также результаты поэтапного применения различных процедур обработки. Основной упор делается на обработку сейсмоакустических данных, так как эта группа методов являлась основной при проведении работ в Петрозаводской губе.

Обработанные геофизические данные в дальнейшем использовались для расчета количественных характеристик среды, выделения сеймостратиграфических комплексов, совместной интерпретации с данными электротомографии и материалами изучения геологического пробоотбора. Важным результатом интерпретации комплексных геолого-геофизических исследований является идентификация потенциально опасных геологических процессов и явлений на изучаемой акватории Онежского озера.

4.1 Обработка сейсмоакустических данных

Проводилась в программном пакете RadExPro («Деко-геофизика СК»). Основной задачей обработки сейсмоакустических данных, полученных с приповерхностной приемно-излучающей системой, является построение качественного сейсмического изображения для сеймостратиграфической интерпретации, а также получение оценки скоростей распространения звука в четвертичных осадках.

Основными задачами обработки данных, полученных с приповерхностной сейсмоакустической системой, является построение качественного сейсмического изображения, оценка скоростей распространения звука в осадке и подготовка сейсмограмм к сеймостратиграфической интерпретации. Полученные данные обрабатывались автором в программном пакете RadExPro. Граф обработки состоит из следующих процедур:

- Загрузка данных и присвоение геометрии наблюдений.
- Контроль качества входных данных.
- Оценка идентичности условий возбуждения и приема.
- Подавление нерегулярных помех.

- Подавление регулярных помех.
- Обработка сигналов.
- Скоростной анализ.
- Построение сейсмических изображений.
- Подготовка данных для динамического анализа.

Ниже приведено описание указанных процедур и продемонстрировано их применение.

Контроль качества сейсмоакустических данных

Контроль качества материалов производился на этапе сбора и камеральной обработки. Производилась оценка пригодности данных для дальнейшей обработки и интерпретации. Оценивались спектральные характеристики сигнала, стабильность работы приемно-излучающей системы, корректность присвоенной навигации и наличие информативности в полученных разрезах. Рассчитывались уровни амплитуды полезных сигналов, шума, соотношение сигнал/помеха.

На начальном этапе контроля качества были рассчитаны амплитудные спектры сигнала по одному из приемных каналов (Рис.27). Для этого рассматривались спектры сигнала и шума до и после фильтрации.

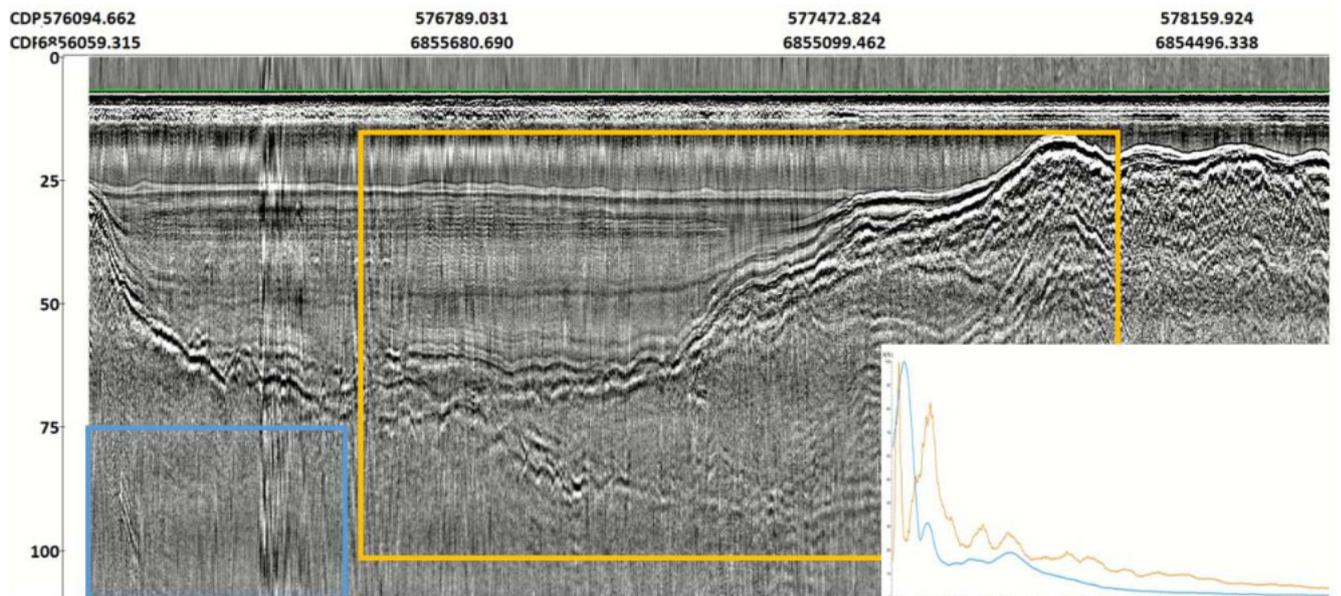


Рис.27 Пример сейсмограммы общего удаления (ОУ), построенной по 3 каналу. Цветом выделены окна расчета амплитудного спектра.

Полосовая фильтрация в частотной области с целью избавиться от низкочастотных помех. Для этого был использован фильтр Баттерворта с параметрами $F1 = 250$ Гц, $F2 = 500$ Гц, $F3 = 2000$ Гц, $F4 = 5500$ Гц. Как по сейсмограмме, так и по ее амплитудному спектру (Рис.28) заметно уменьшение влияния низкочастотных шумов, создаваемых судном.

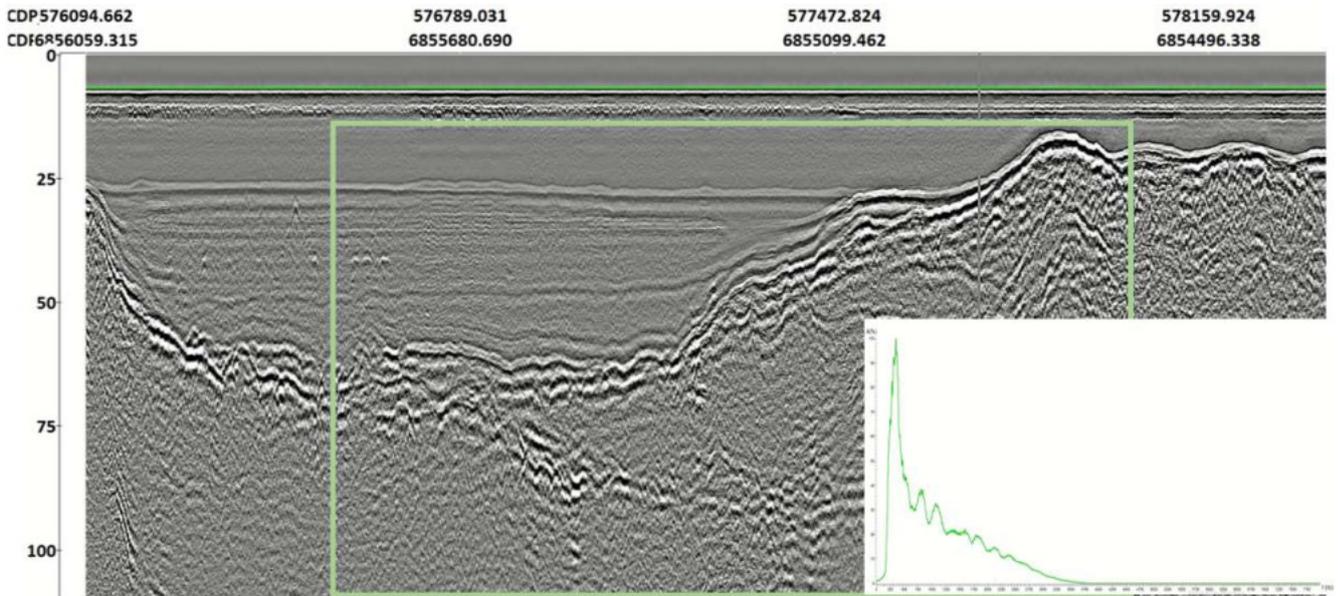


Рис.28 Пример сейсмограммы общего удаления (ОУ) после полосовой фильтрации. Видно значительное улучшение качества волновой картины по сравнению с рис. 29.

Были попытки подавить также помеху электромагнитной природы с центральной частотой 2500 Гц с помощью режекторного фильтра, но из-за его большой крутизны возникает эффект Гиббса, что приводит к значительному ухудшению качества волновой картины. При этом если посмотреть на спектр, посчитанный для информативной части записи (показан оранжевым цветом), то видно, что помеха на 2500 Гц практически не различима на фоне спектра полезного сигнала и ее вклад очень мал.

На приповерхностной косе наблюдается довольно сильное взаимное влияние каналов. Это можно заметить, во-первых, по повторяющейся несколько раз прямой волне, на каналах, дальше первого, а также по отражению от дна на дальних каналах, оно тоже становится нечетким и сложно однозначно выделить первые вступления (Рис.29). Данная проблема связана с технологическим строением косы – она не является дифференциальной и на записи видны слабоамплитудные «повторения» сигнала, зарегистрированного соседним приемником. Однако данная помеха обладает амплитудой в 20 раз меньшей, чем целевой сигнал и не оказывает влияния на данные, хотя и заметна в начале записи.

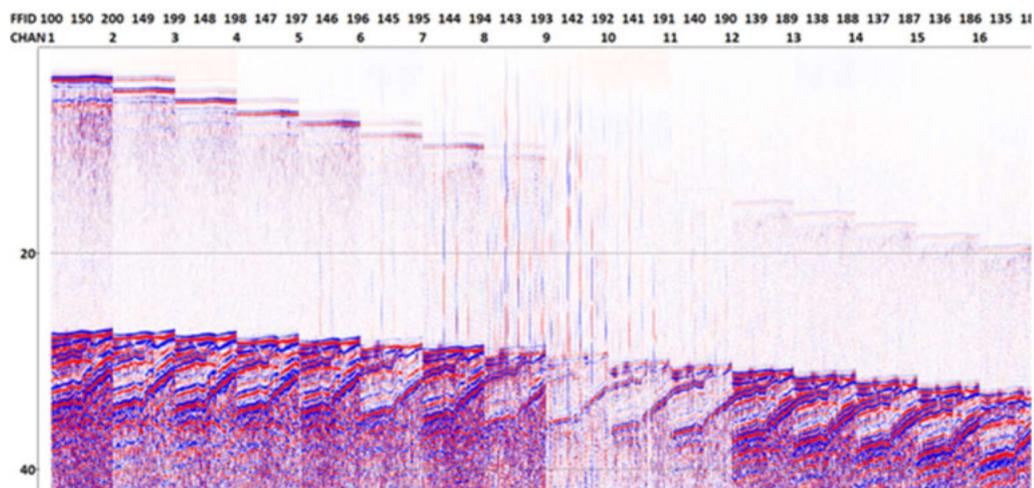


Рис.29 Фрагмент записи ССВР 2016 г, сейсмограммы общего удаления по каждому из каналов приемной косы.

Дальше были посчитаны для каждого канала по фрагменту дна значения среднеквадратических амплитуд сигнала в окне 4 мс от начала донного импульса, а затем отношение сигнал/помеха. Среднеквадратические амплитуды помехи рассчитывались в окне длиной 5 мс на участке записи до прихода отражения от дна (21-26 мс) (Рис.30).

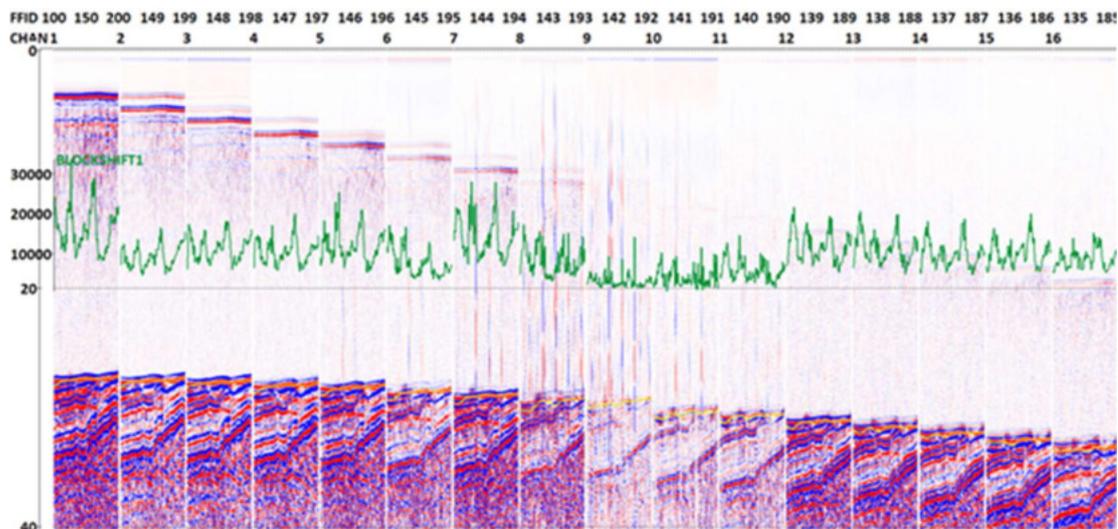


Рис.30 Сейсмограммы общего удаления с графиком среднеквадратичных амплитуд (зеленым цветом), рассчитанных для донного импульса в диапазоне 5 мс.

Для расчета соотношения сигнал/помеха на вход подавались среднеквадратичные амплитуды донного отражения, а также полученные ранее амплитуды шума. Среднее соотношение сигнал/помеха превышает 10, что является довольно хорошим результатом (Рис.31). Понижение амплитуд заметно на каналах 9-11. Это связано с технологическим устройством приемной сейсмокосы.

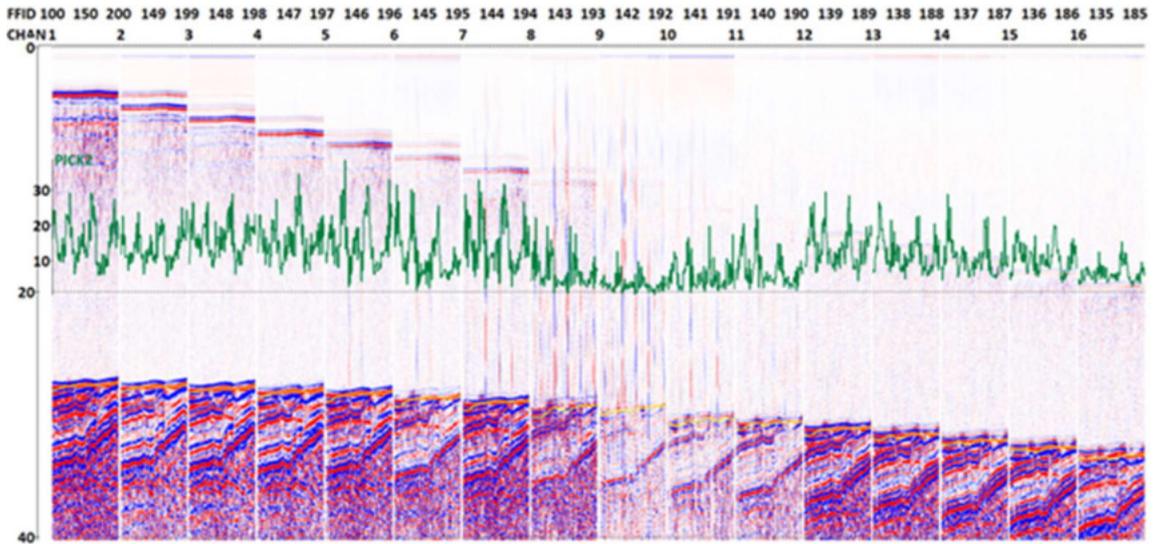


Рис.31 Характерный результат расчета значений отношения сигнал/помеха ,

Ввод геометрии наблюдений состоял из двух основных этапов:

- a. Загрузка навигационных файлов и информации о геометрии расстановки в модуль Marine geometry input (Рис.32)
- b. Проверка правильности ввода геометрии с помощью расчета теоретического времени прихода волны, отраженной от дна (Рис.33)

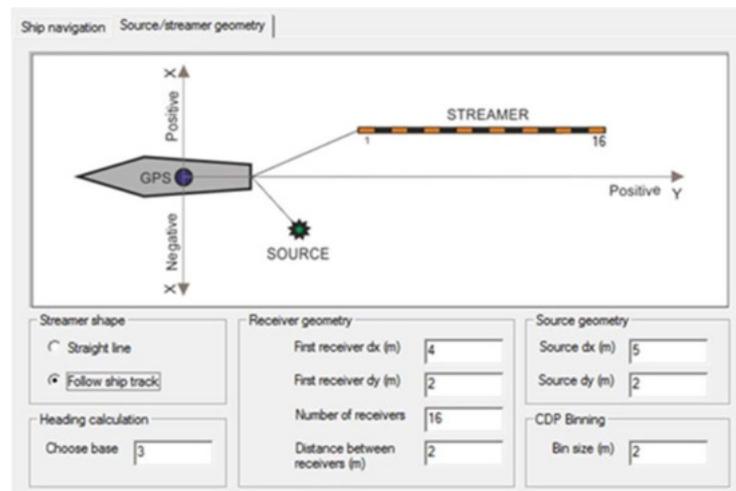


Рис.32. Вид окна модуля, использовавшегося для присвоения геометрии. Размер бина выбирался исходя из того, чтобы получить среднюю кратность, равную 16.

$$V_i = \sqrt{\frac{(V_2^2 * T_2) - (V_1^2 * T_1)}{T_2 - T_1}}$$

Были построены супер-сейсмограммы и произведена автоматическая регулировка усиления амплитуд в окне для упрощения анализа спектров вертикальных скоростей (Рис.35).

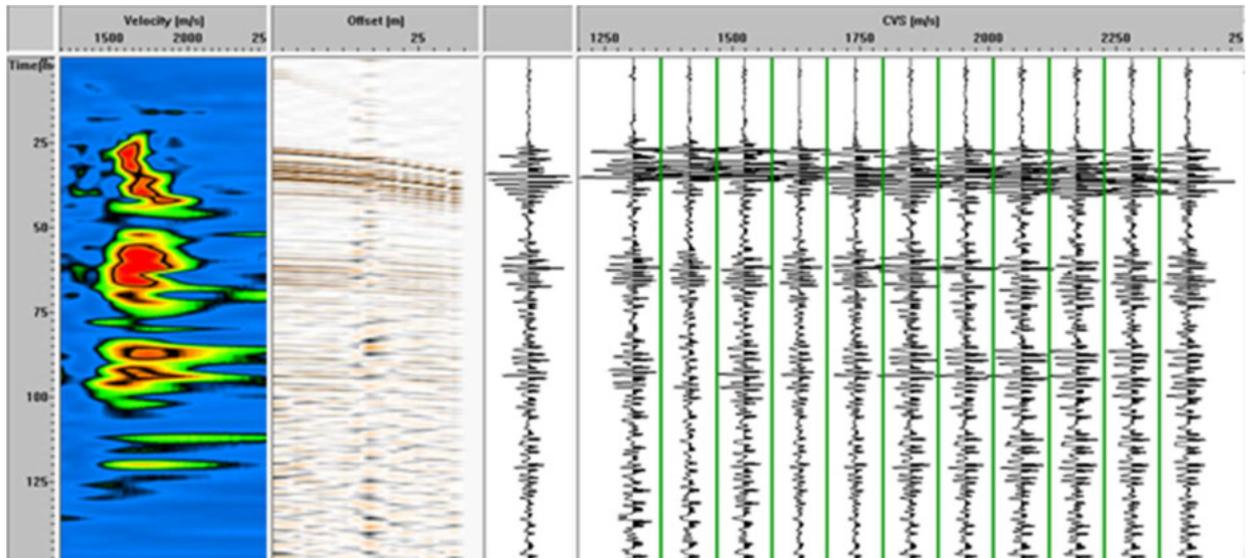


Рис.35. Пример внешнего вида окна вертикального спектра скоростей и суперсейсмограммы ОСТ.

В условиях проведения съемки, глубинность скоростного анализа сильно зависит от геологического строения конкретной точки ОСТ. На основании анализа эффективных скоростей, были рассчитаны пластовые скорости для каждого из выделяемых сейсмокомплексов.

Ввод кинематических поправок

Процент топ-мьютинга на рисунках ниже равен 5. Выбирался таким образом, чтобы не использовать при дальнейшем суммировании сигналы, которые растянулись при вводе кинематических поправок (Рис.36, Рис.37).

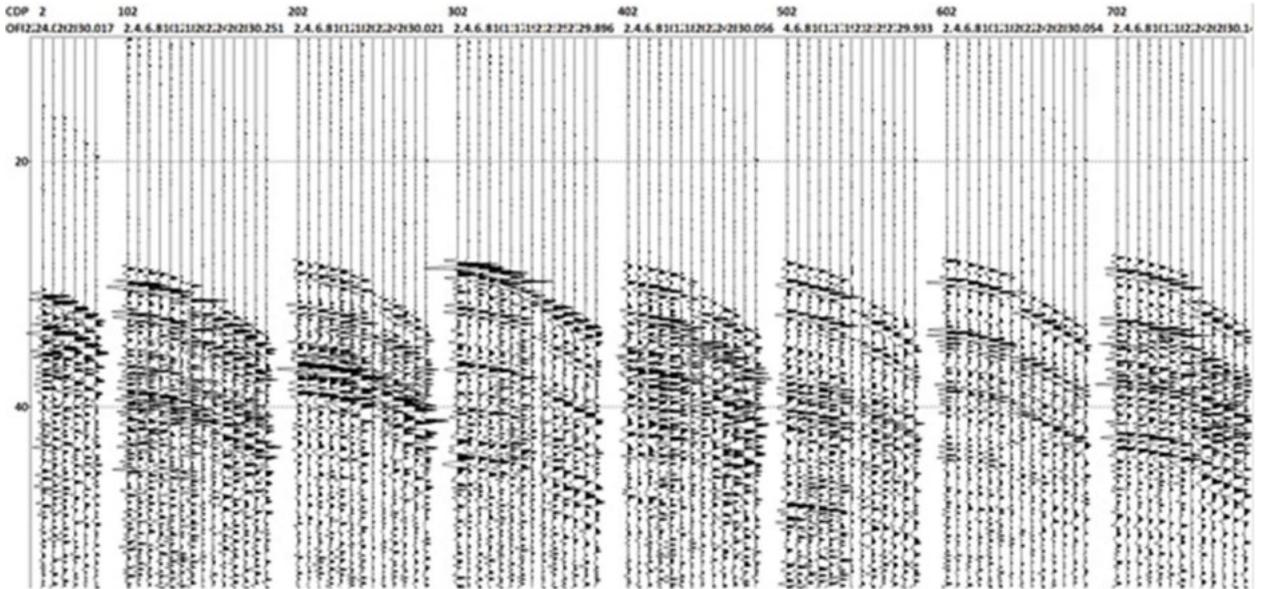


Рис.36 Пример сейсмограмм ОСТ до ввода кинематических поправок.

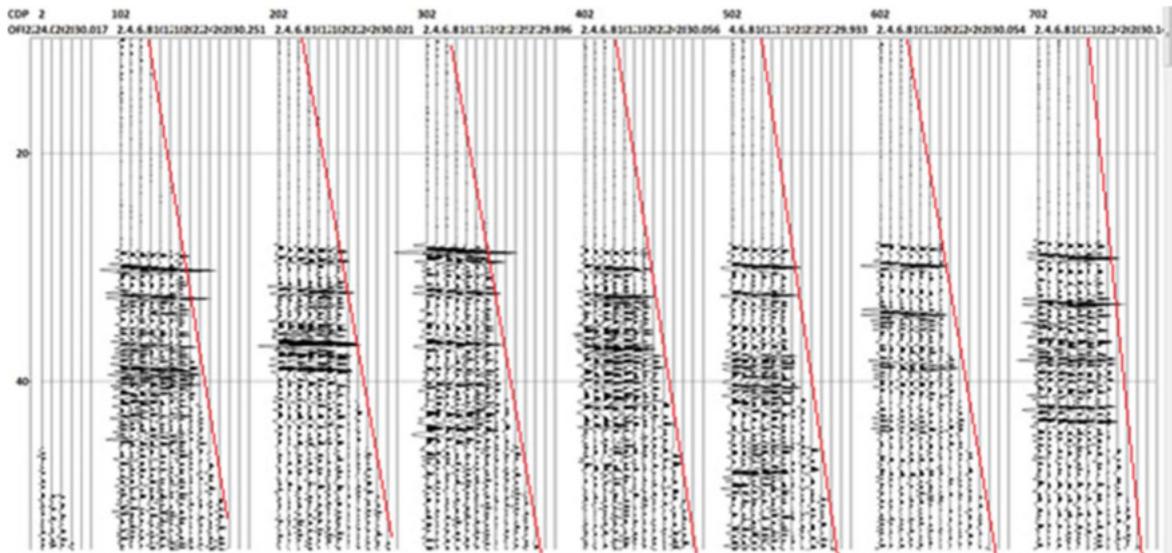


Рис.37 Пример сейсмограмм ОСТ после ввода кинематических поправок.

Суммирование сейсмических данных по ОСТ

В результате были получены разрезы нулевых удалений по всем сейсмоакустическим профилям на полигоне (Рис.38).

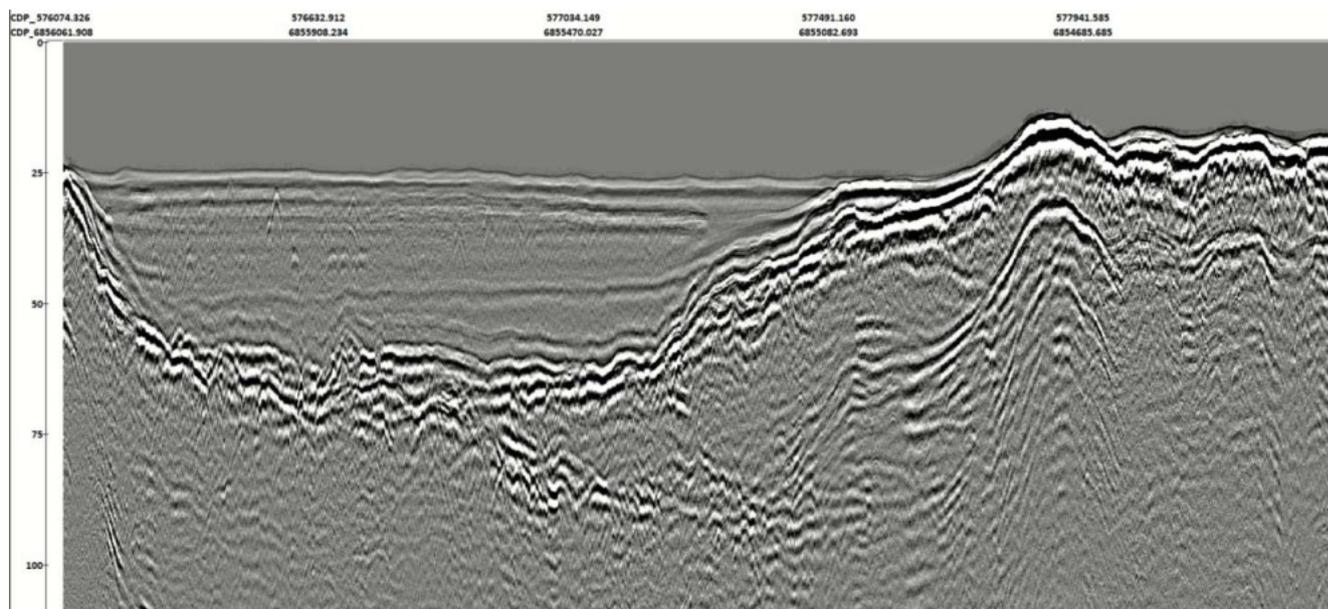


Рис.38 Пример данных по одному из продольных профилей, полученных после суммирования по ОСТ. Видно значительное ослабление некогерентных помех и увеличение соотношения сигнал/шум по сравнению с исходными данными на рис. 28.

Импульсная деконволюция сигнала.

Основной задачей применения импульсной деконволюции к сейсмоакустическим данным является сужение импульса, приведение его к минимально-фазовому, расширение спектра сигнала, и как следствие, увеличению разрешающей способности записи. В качестве исходного импульса, подаваемого на вход алгоритма обратной фильтрации использовалось отражение от дна. Для этого выбирался участок с ровным дном без мест, осложненных геологическими факторами – выклиниваем поддонных границ, наличием газонасыщенных осадков. Затем этот участок дна выравнивался и усреднялся, чтобы получить сигнатуру сигнала. После применения процедуры обратной фильтрации, применялся полосовой фильтр для устранения помех, которые могут возникать после деконволюции (Рис.39, Рис.40).

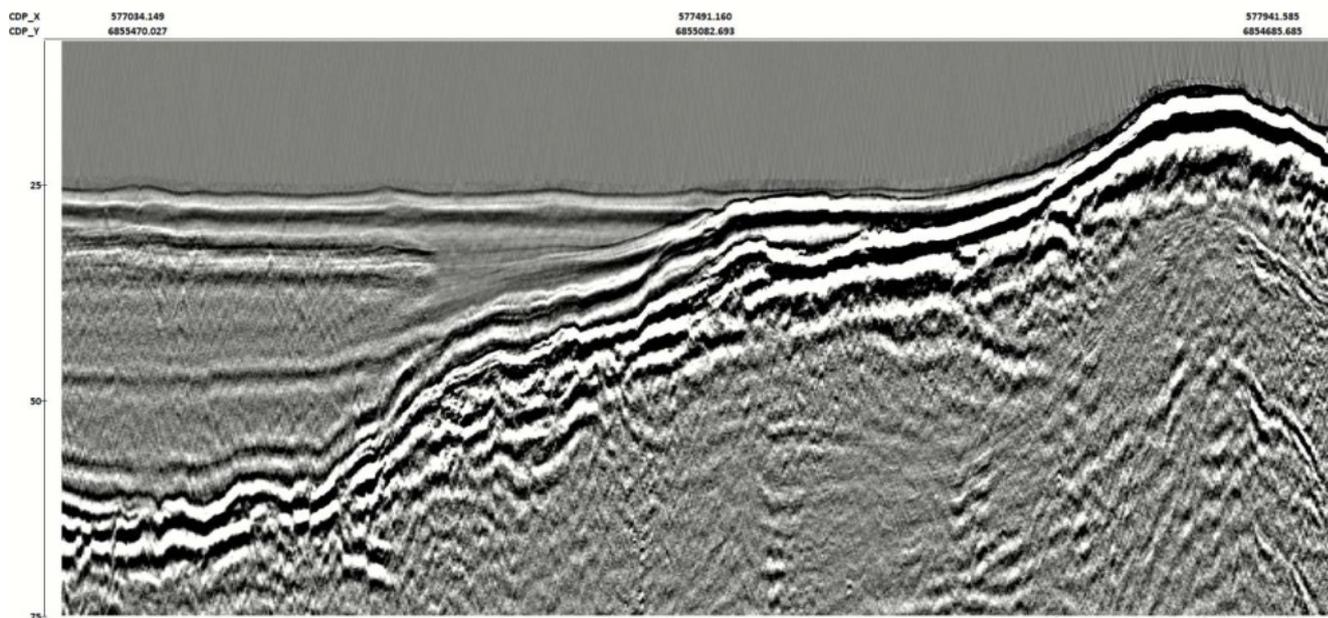


Рис.39 Фрагмент сейсмоакустического профиля до применения процедуры деконволюции.

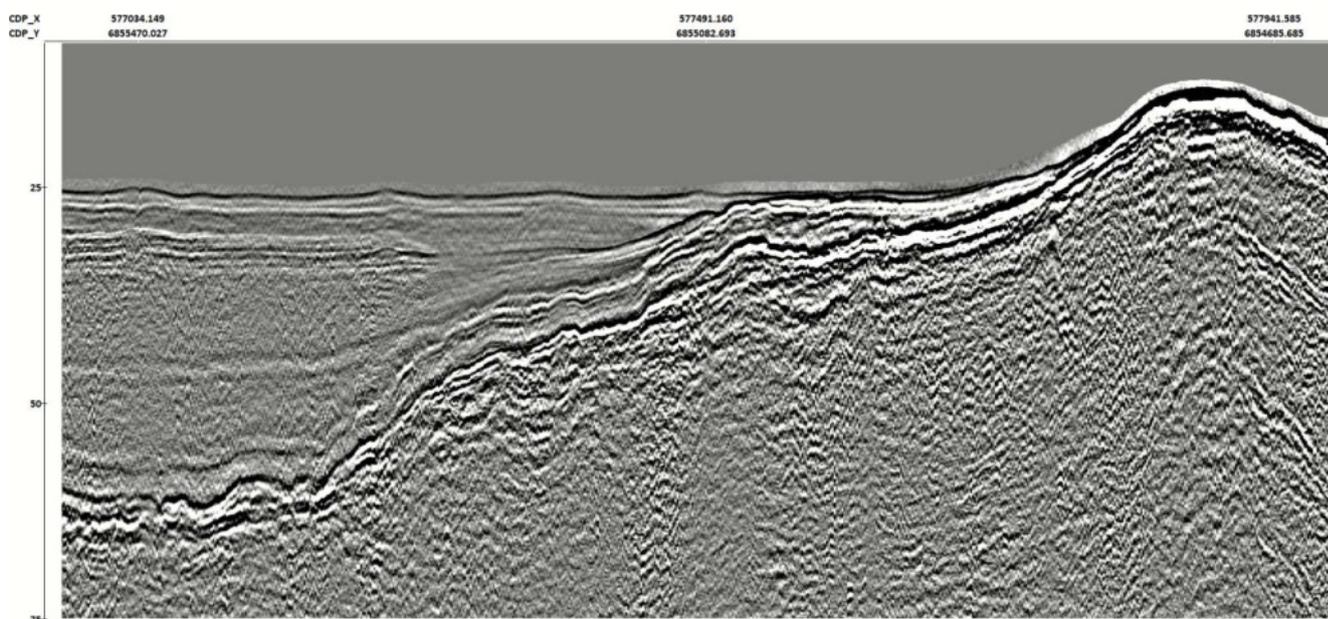


Рис.40. Фрагмент сейсмоакустического профиля после применения процедуры деконволюции.

Благодаря применению импульсной деконволюции удалось сократить длину импульса с 5 мс до 2.5 мс, что позволяет добиться вертикальной разрешающей способности 0.5 м для наиболее глубоких отражающих горизонтов.

Миграция Столта в F-K области

Процедура миграции использовалась для восстановления геометрии сейсмоакустических границ и выделения локальных объектов. В связи с малыми глубинами исследования (первые 50 м) и преимущественно низкоскоростными породами, слагающими осадочный чехол озера, было принято решение использовать миграцию Столта в F-K области с постоянной скоростью 1.46 м/с (Рис.41, Рис.42).

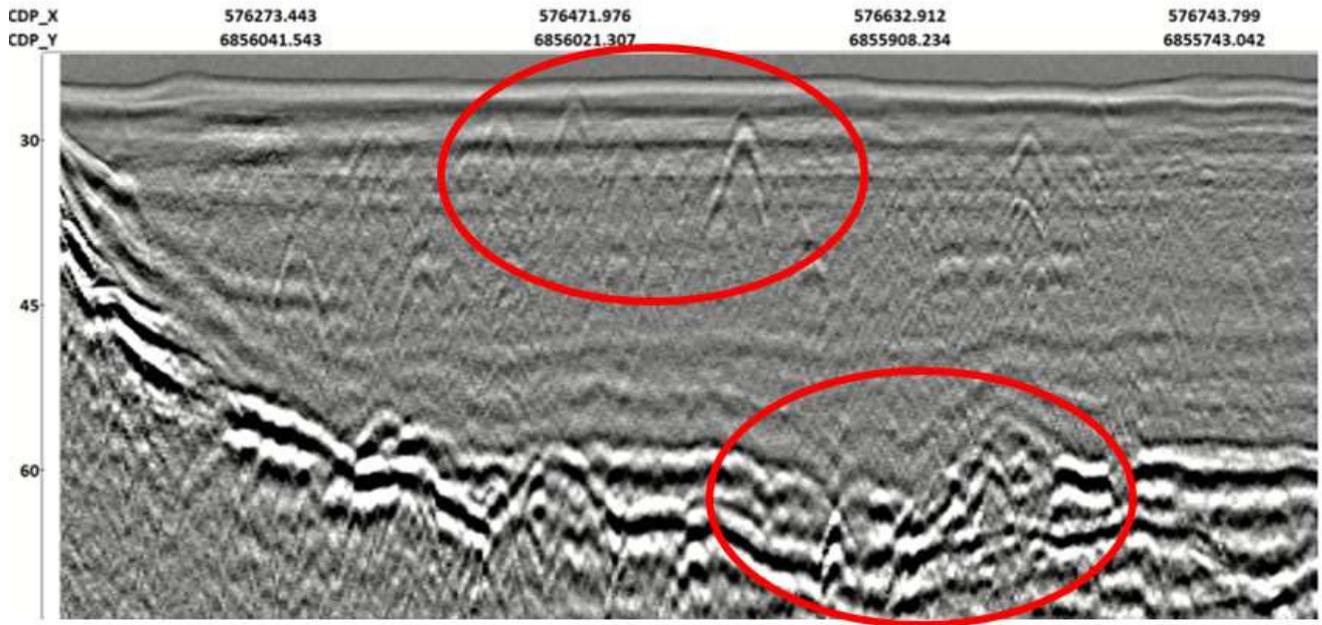


Рис.41 Пример сейсмоакустических данных до миграции Столта

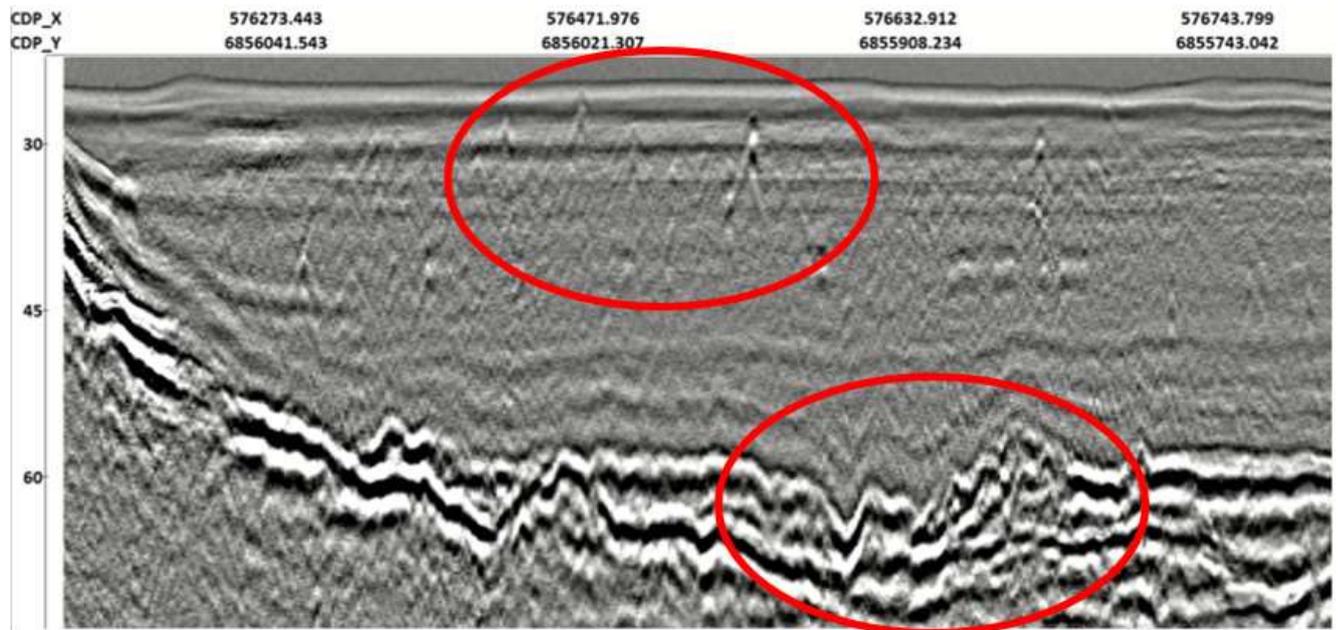


Рис.42 Пример сейсмоакустических данных после миграции Столта.

Миграция Столта позволила восстановить геометрию границ, а также «сжать» гиперболы, возникающие при дифракции сигнала на точечных объектах или в газонасыщенных толщах.

В результате обработки данных, полученных приповерхностной приемно-излучающей системой удалось провести скоростной анализ, а также подготовить сейсмоакустические данные к дальнейшей геологической интерпретации благодаря устранению волн-помех. Вертикальная разрешающая способность обработанных данных превышает 0.5 м на протяжении всей информативной части записи. Вертикальный скоростной анализ сейсмоакустических данных позволил дать оценку эффективных и интервальных скоростей в осадочном чехле Онежского озера. На всей изученной площади наблюдается преимущественно нормальный скоростной

закон, скорости звука растут в диапазоне 1500-2200 м/с. Однако в зонах повышенной газонасыщенности осадков, она падает на до 1100-1300 м/с. Также знание скоростного закона в среде позволило перейти к оценке мощностей пород, слагающих осадочный чехол Петрозаводской губы.

4.2 Особенности графа обработки данных, полученных заглубленной системой.

В отличие от стандартных данных с приповерхностной приемно-излучающей системой, при работе с заглубленным источником и антенной возможно получение данных, не осложненных влиянием волн-спутников. Это открывает возможности для дальнейшей динамической интерпретации, в частности – оценке значений коэффициентов отражения от основных отражающих горизонтов.

Граф обработки данных, полученных с помощью заглублённой сейсмоакустической системы во многом схож с ранее представленным в работе, однако существенно различается процедура присвоения геометрии наблюдений. Это связано с тем, что во время проведения съемки отсутствовала какая-либо система подводной навигации и присвоение геометрии классической для ССВР методикой оказалось невозможным. Восстановление положений источника и приемника для каждой сейсмотрассы производилось по акустическим данным.

На начальном этапе обработки при визуальном анализе данных, полученных с помощью заглубленной приемно-излучающей системы, в сортировке ОПВ выделяются некоторые отклонения от нормы (Рис.43):

1. Годографы волн, отраженных от дна и нижележащих границ, имеют негиперболическую форму.
2. Спутники источника и приемника пересекаются.

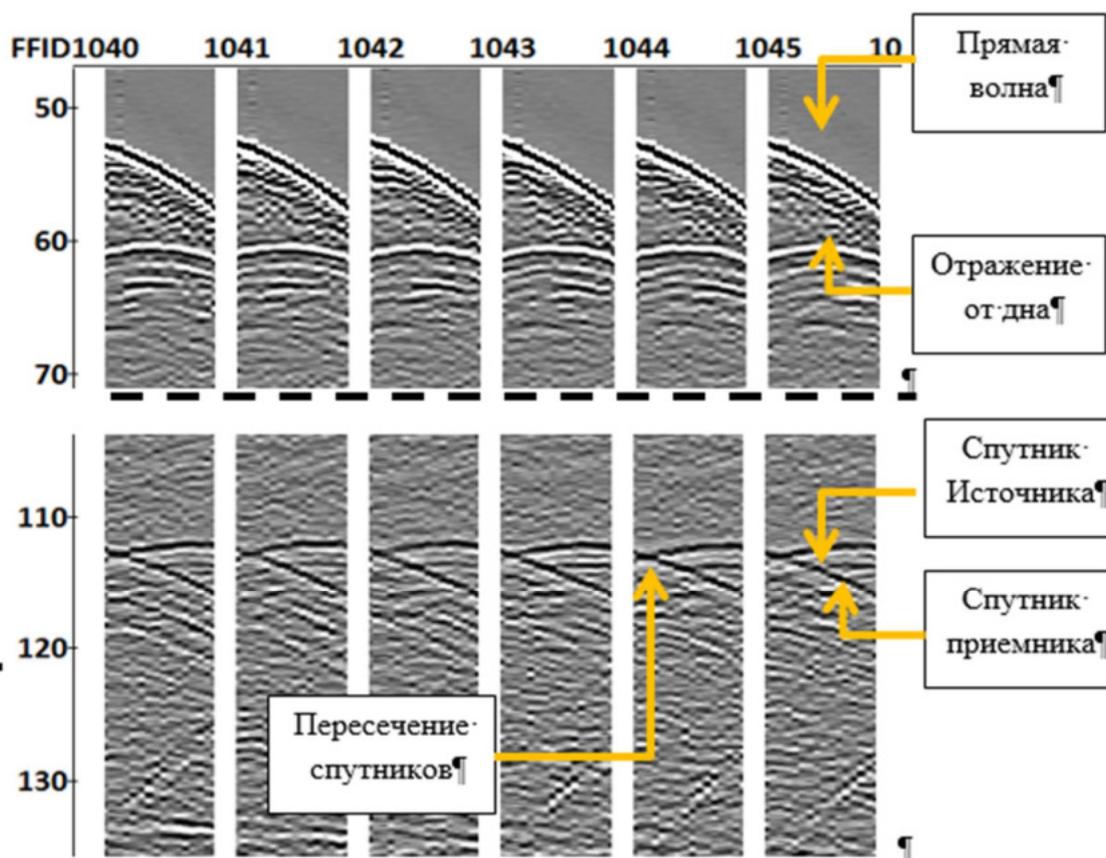


Рис.43 Негиперболичность годографов и пересечение волн-спутников на сейсмограммах ОПВ.

Негиперболичность годографа вызвана специфическим взаимным расположением источника и приемников. За счет этого отраженные от дна и нижележащих границ волны приходили на срединные приемники быстрее, чем на первые. Наличие данного факта делает невозможным спрямление годографов даже при вводе корректных скоростей распространения звука в воде.

Пересечение спутников свидетельствует о наклонном расположении косы в вертикальной плоскости. При подобной приемной системе отраженные от дна и поддонных границ волны приходят на дальние каналы раньше, чем пришли бы при горизонтально расположенной косе. Вследствие этого скорости получаются завышенные.

Для решения вышеперечисленных проблем необходимо вывести источник и приемники на один уровень. При присвоении геометрии вводились статические поправки, необходимые для корректировки влияния негоризонтального расположения приёмной линии. Для этого по сейсмоакустическим данным были произведены следующие расчёты:

- Расчёт заглубления источника
- Расчёт заглубления приемников

- Расчёт вертикального расстояния от приемника до дна
- Решение прямой задачи для проверки расчётов
- Приведение к одному уровню источника и приемника. Ввод соответствующих статических поправок

После ввода статических поправок годографы отражённых волн на сейсмограммах ОПВ приняли гиперболический вид (Рис.44). Скорость распространения продольной волны, определённая по полученным гиперболам, соответствует скорости упругих волн в солёной воде – 1480 м/с.

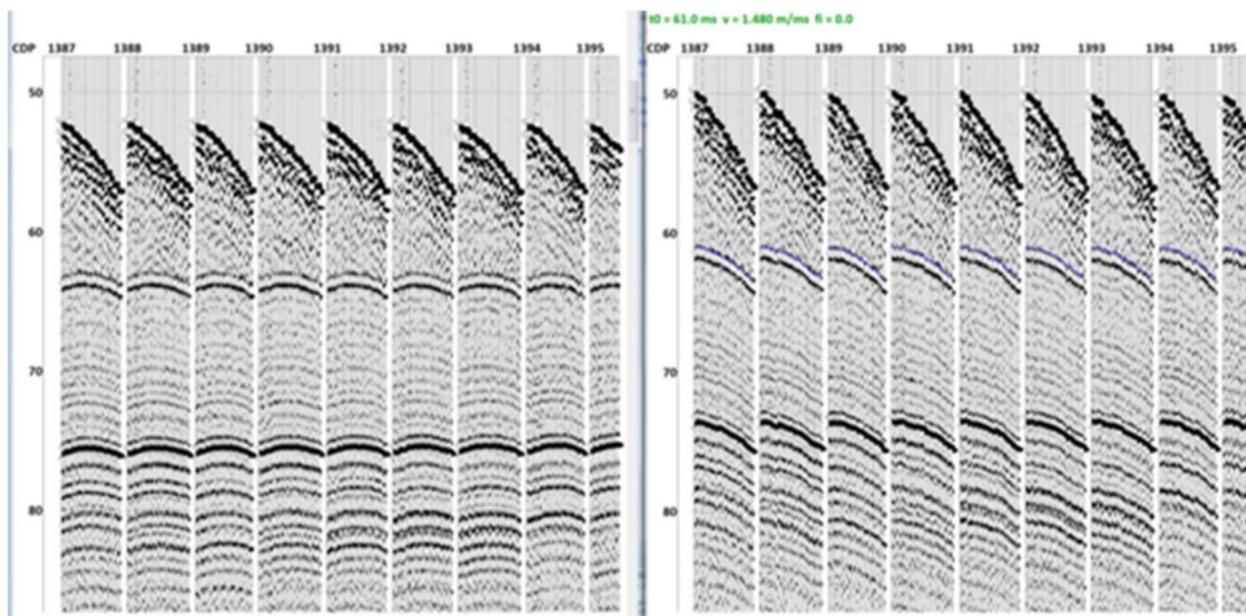


Рис.44 Сейсмограммы ОПВ до (слева) и после (справа) введения статических поправок

Дальнейшая обработка не отличается от описанной выше методики обработки данных, полученных при работе с приповерхностной многоканальной косой. Указанные процедуры позволили подготовить сейсмоакустические данные с заглубленной приемно-излучающей системы к количественной интерпретации. За счет устранения влияния волн-спутников на основе сейсмоакустических материалов производились дальнейшие вычисления коэффициентов отражения для зон с приповерхностной газонасыщенностью в осадках.

4.3 Обработка данных электротомографии

Обработка полевых данных метода ЭТ и получение геоэлектрических разрезов проводилась в несколько этапов.

На первом этапе происходило построение разрезов кажущегося сопротивления и подготовка данных для проведения двумерной инверсии. Для работы с разрезами кажущегося сопротивления применяется программа «X2IPi» (А. А. Бобачев). Этот этап включает в себя отбраковку плохо измеренных точек, возникающих вследствие влияния электромагнитных помех, которые, как правило, проявляются на больших разносах. В ходе обработки полевых данных для каждого физического измерения по формуле (1) были рассчитаны значения ρ_k :

$$\rho_k = K \frac{\Delta U}{I}, \text{ где } K = \frac{2\pi}{1/AM - 1/AN}, \quad (1)$$

где ρ_k – кажущееся сопротивление в Ом·м, ΔU – разность потенциалов на измерительных электродах в мВ, I – сила тока в генераторной цепи в мА, AM , AN – расстояния между соответствующими электродами.

Далее была произведена съемка рельефа с предоставленных карт, его оцифровка и ввод в данные кажущегося сопротивления, в результате чего были получены псевдоразрезы кажущегося сопротивления ρ_k . Псевдоразрез кажущегося сопротивления – это графическое представление данных $\rho_k(x, r)$ в виде разреза, где в точках x (расстояние по профилю) и r (действующий разнос АО или ОВ), ρ_k – удельное кажущееся сопротивление в данной точке (x, r) . При этом разрез ρ_k рисуется относительно поверхности земли. Рельеф оказывает значительное влияние на данные электротомографии, поэтому в программе инверсии его учет автоматически выполняется для всего разреза необходимым фактором.

Следующим этапом является двумерная инверсия, выполняемая в программе Res2DInv (ООО «Логис»). Для получения качественной и информативной инверсии необходимо оптимально подобрать множество параметров. На данном этапе строится несколько инверсий с различными параметрами и выбирается наиболее информативная. В результате получается геоэлектрический разрез (Рис.45) – совокупность отдельных слоев конечной мощности и постоянного внутри каждого слоя удельного электрического сопротивления.

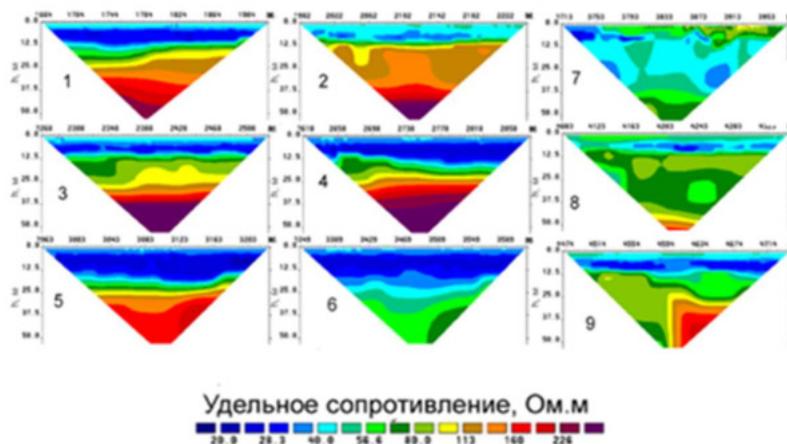


Рис.45. Геоэлектрические разрезы по 9 профилям в Петрозаводской губе по данным электротомографии.

Расчет электромагнитной инверсии происходил с учетом формы сейсмоакустических границ, полученных в ходе интерпретации данных сейсмоакустики. После проведения инверсии, данные анализировались совместно с разрезами ССВР (Рис.46).

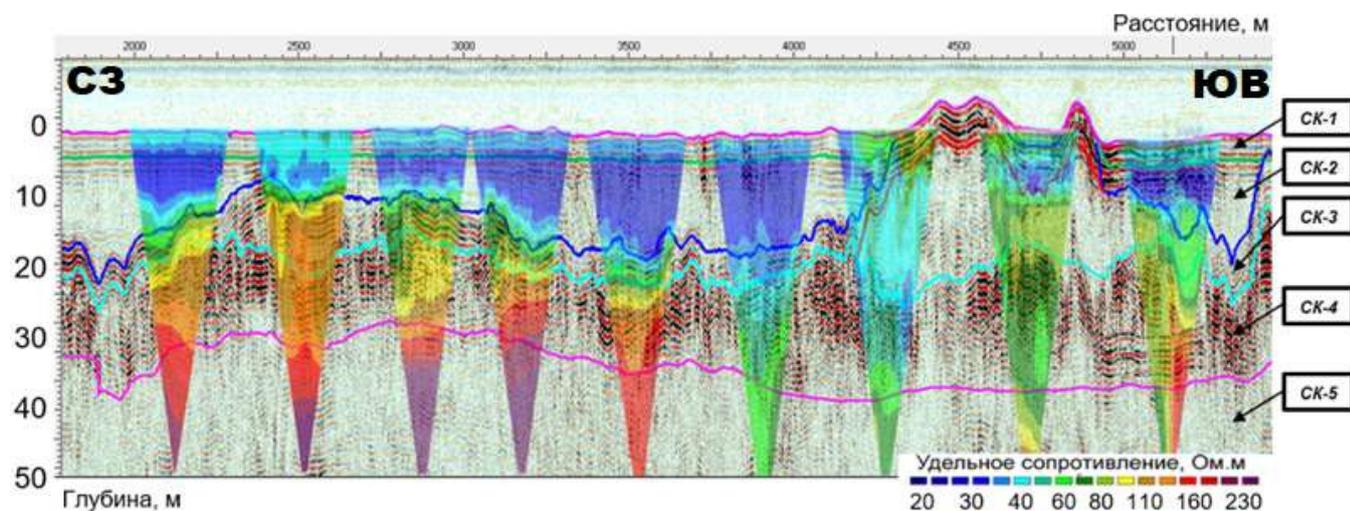


Рис.46. , Сопоставление геоэлектрических разрезов, полученных по данным донной электротомографии с выделенными сейсмоакустическими комплексами (по материалам работы А. К. Миринец, А. А. Бобачева и А. Е. Рыбалко., 2022)

При сопоставлении представленного геоэлектрического разреза с положением сейсмоакустических границ отчетливо видна хорошая корреляция между положением кровли СК-3 и областями пониженных значений удельного электрического сопротивления (20-30 Ом*м). На ЮВ участке профиля ярко проявляется повышение УЭС, которые можно интерпретировать как смену литологического состава осадков.

4.4 Обработка данных гидролокации бокового обзора

Основной задачей обработки данных, полученных методом ГЛБО является составление акустического изображения дна по всей площади исследования для идентификации геоморфологических элементов, отличающихся характеристиками мезо- и микрорельефа. Полученные материалы используются как для геолого-геоморфологической интерпретации, так и для идентификации опасных геологических процессов и явлений, проявляющихся на дне и в верхней части грунтового массива (СП 504,1325800.2021, 2021).

Для обработки данных ГЛБО использовался программный пакет SonarWiz. Данные в формате XTF были импортированы и переведены во внутренний формат CSF. Обработка производилась по следующему графу:

1. Импорт данных в проект SonarWiz
2. Выделение первых вступлений в полуавтоматическом режиме
3. Коррекция за наклонную дальность
4. Коррекция амплитуды сигнала
5. Сбор мозаики ГЛБО

При импорте данных ГЛБО происходил контроль качества собранных материалов. Дополнительное усиление при загрузке файлов в проект SonarWiz не использовалось. Выделение времен первых вступлений рассеянного акустического сигнала происходило с помощью процедуры Bottom tracking в полуавтоматическом режиме. Параметры модуля подбирались таким образом, чтобы пикировка максимально точно описывала форму дна (Рис.47).

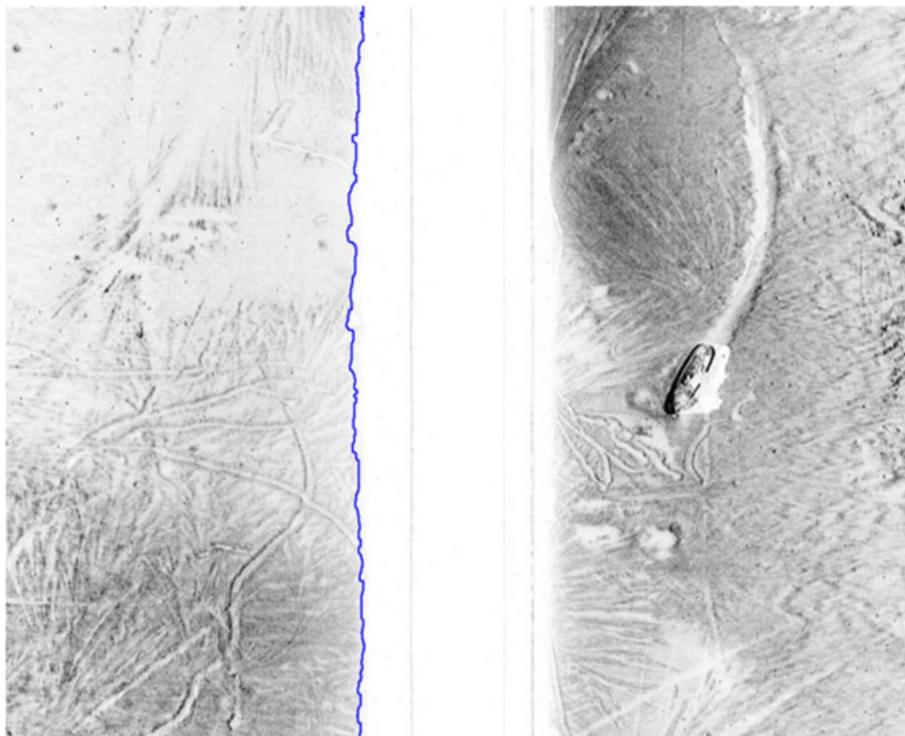


Рис.47 Пример исходных данных ГЛБО по двум бортам до ввода поправок за наклонную дальность и коррекции амплитуд.

После выделения первых приходов была введена поправка за наклонную дальность. Данная процедура делалась в автоматическом режиме (Рис.48). Каждый галс просматривался после данной процедуры чтобы минимизировать ошибки пикировки и получить наиболее равномерное изображение без каких-то резких «скачков» между данными с двух бортов.

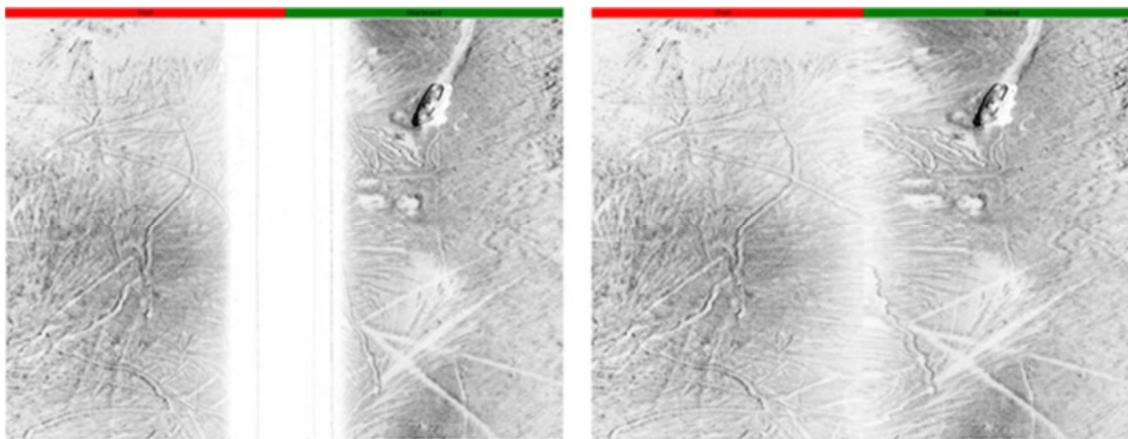


Рис.48 Слева изображена сонарограмма до ввода поправки за наклонную дальность, справа - после.

Затем происходила коррекция амплитуд сигнала с помощью различных фильтров SonarWiz: EGN (Empirical gain normalization), TVG (Time variant gain), AGC (automatic gain control). Данные процедуры позволили получить более равномерное распределение амплитуд сигнала вдоль всей записи (Рис.49). В дальнейшем это будет полезно для анализа мозаики ГЛБО.

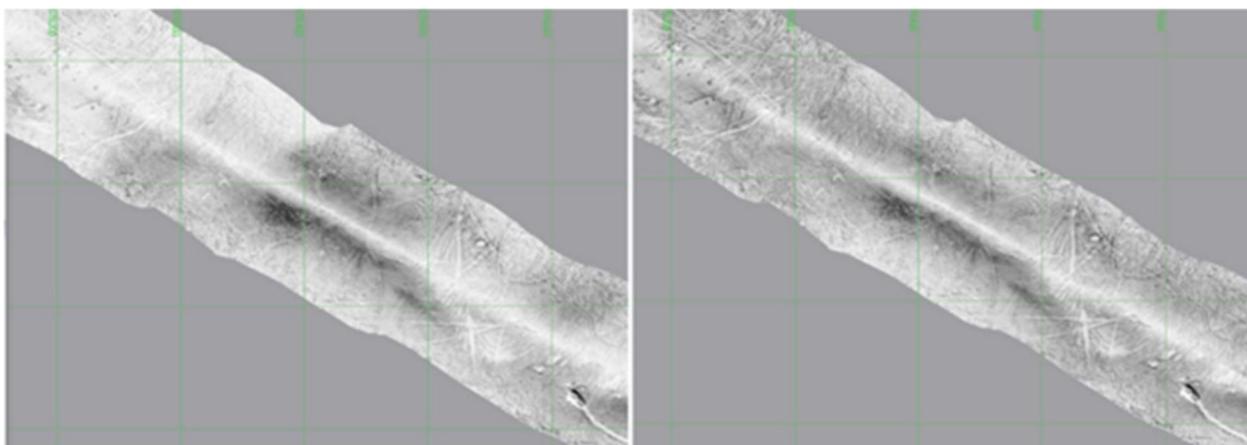


Рис.49 Пример гидроакустического изображения коррекции амплитуд сигнала (Слева - до ввода коррекции амплитуд, справа – после).

В ходе дальнейшей обработки происходил подбор режима наложения сонарограмм, ширины полосы обзора и порядка отображения галсов. Целью являлось получение наиболее равномерно «освещенного» изображения дна с сохранением динамических характеристик сигнала. В результате была получена мозаика ГЛБО (Рис.50).

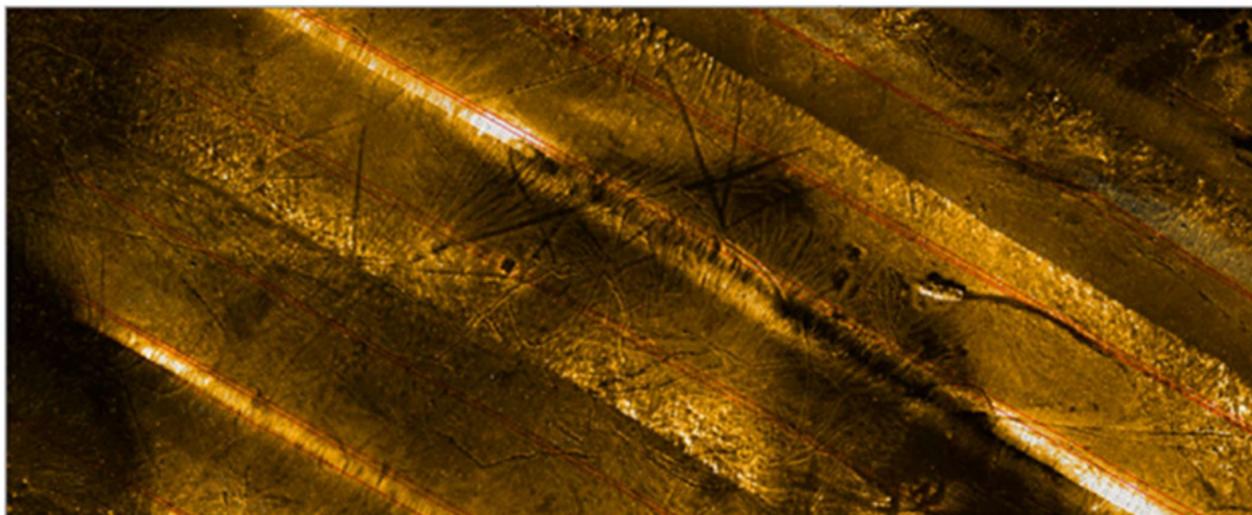


Рис.50 Фрагмент планшета акустической мозаики (светлые тона соответствуют повышенным амплитудам рассеянного сигнала, темные – пониженным). В правой части рисунка наблюдается затонувшее плавательное средство. В центральной части видны следы якорей и изометричные понижения в рельефе дна.

В результате обработки для исследуемой части Петрозаводской губы Онежского озера была построена мозаика данных ГЛБО для последующей интерпретации. Эти данные позволили выявить зоны флюидной разгрузки (покмарки), зоны антропогенного воздействия на морское дно, а также зоны литологической неоднородности осадков и увязать их с формами рельефа.

4.5 Обработка данных акустического профилирования

Целью проведения акустического профилирования является детальное изучение верхней части разреза. Задачей обработки являлось устранение помех на данных, увеличение соотношения сигнал/шум и улучшение визуализации для последующей интерпретации. Обработка данных акустического профилирования производилась в программном обеспечении RadExPro. Обработка проходила по следующему графу:

1. Загрузка данных в формате SGY в проект обработки
2. Устранение высокоамплитудных выбросов
3. Коррекция амплитуд за сферическое расхождение сигнала
4. Миграция Столта с постоянной скоростью в F-K области
5. Преобразование Гильберта
6. Экспорт обработанных файлов в формате SEG-Y

Исходные данные профилографа находятся во внутреннем формате .SES и предварительно были конвертированы в международный формат .SGY с помощью специальной утилиты. Исходные данные высокого качества, однако на них присутствуют высокоамплитудные помехи от одновременной работы спаркера (Рис.51).

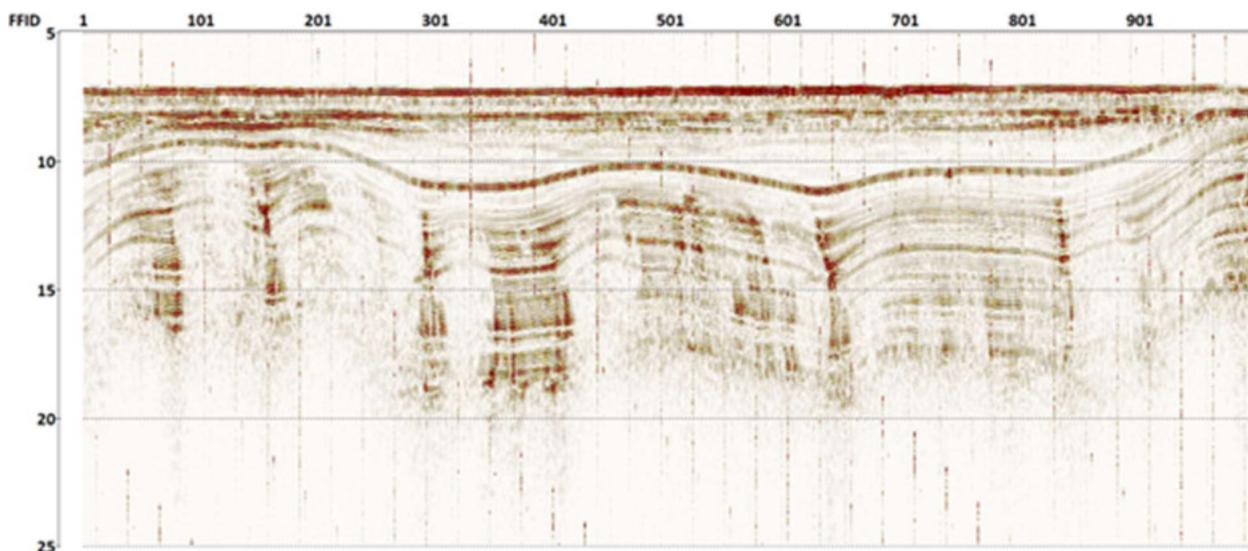


Рис.51 Пример волновой картины на исходных данных акустического профилографа (АПр). Масштаб: временной, мс.

Для устранения высокоамплитудных помех использовался модуль Burst Noise Removal, который позволяет в автоматическом режиме подобрать коэффициент ослабления для подобных сигналов. В результате применения этой процедуры, помехи были успешно подавлены без потери качества материалов (Рис.52). Особенно это заметно в нижней части сейсмограммы, где полезный сигнал практически отсутствует.

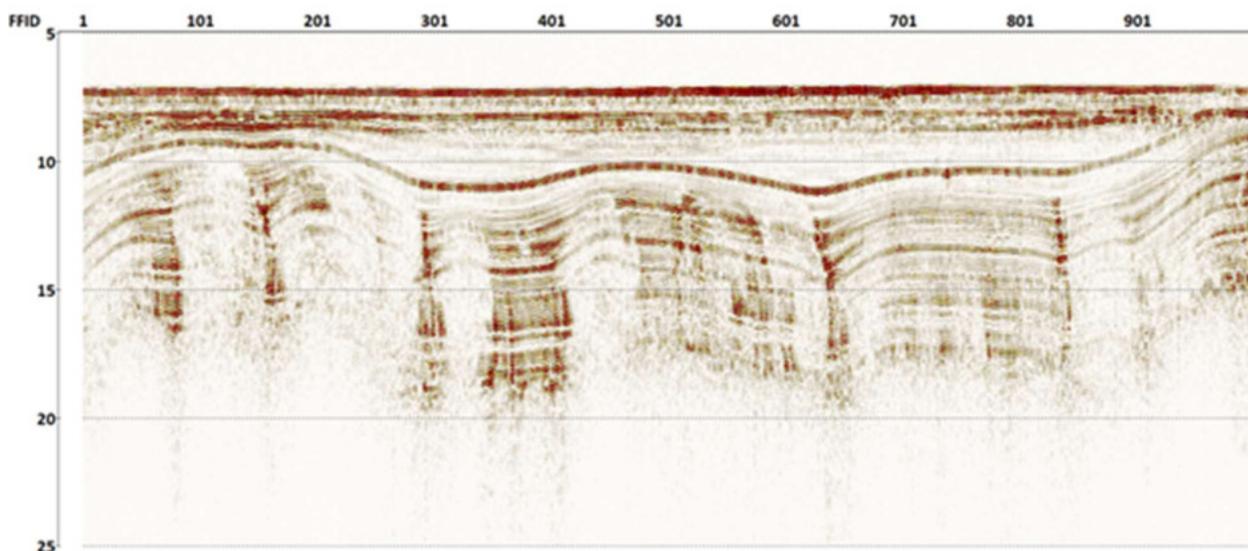


Рис.52 Волновая картина после устранения высокоамплитудных помех на данных АПр.

Таким образом удалось избавиться от высокоамплитудных «выбросов». Для дальнейшей корректной интерпретации акустических данных вводилась коррекция амплитуд за сферическое

расхождения сигнала с помощью модуля Amplitude correction (Рис.53). В этом процессе фактически сеймотрассы помножались на линейную функцию.

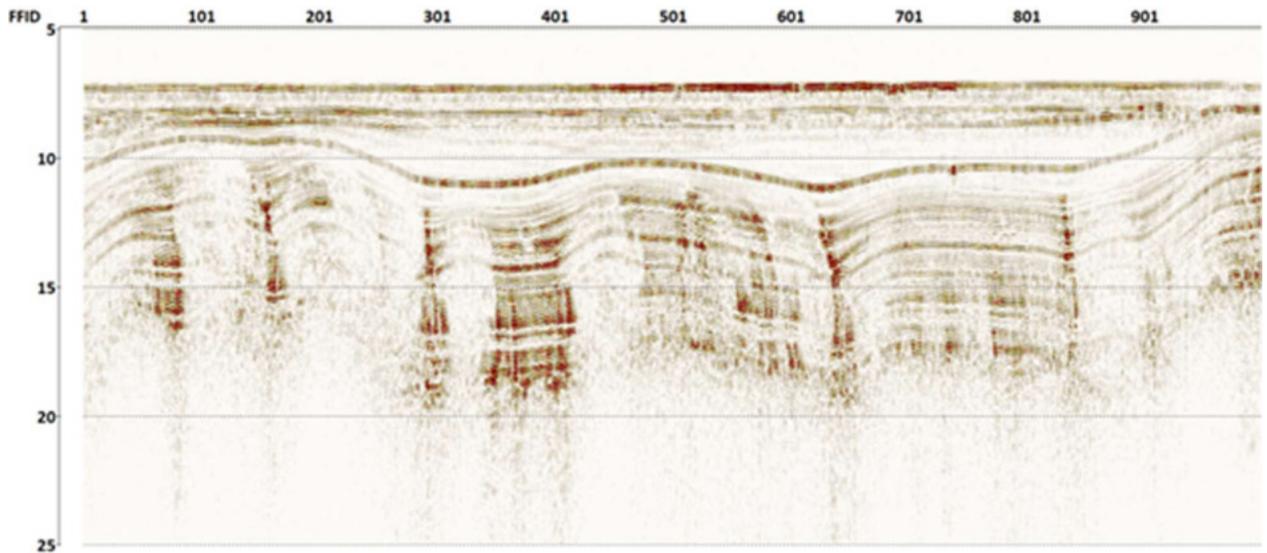


Рис.53 Данные профилографа после ввода коррекции амплитуд за сферическое расхождение сигнала.

Следующим этапом обработки являлась сейсмическая миграция Столта. Данный алгоритм справедлив для сред с скоростным законом, близким к постоянному, что можно сказать о верхних метрах осадочного чехла Онежского озера. При этом алгоритм позволил устранить гиперболы от точечных дифракторов, а также восстановить истинную форму наклонных границ (Рис.54).

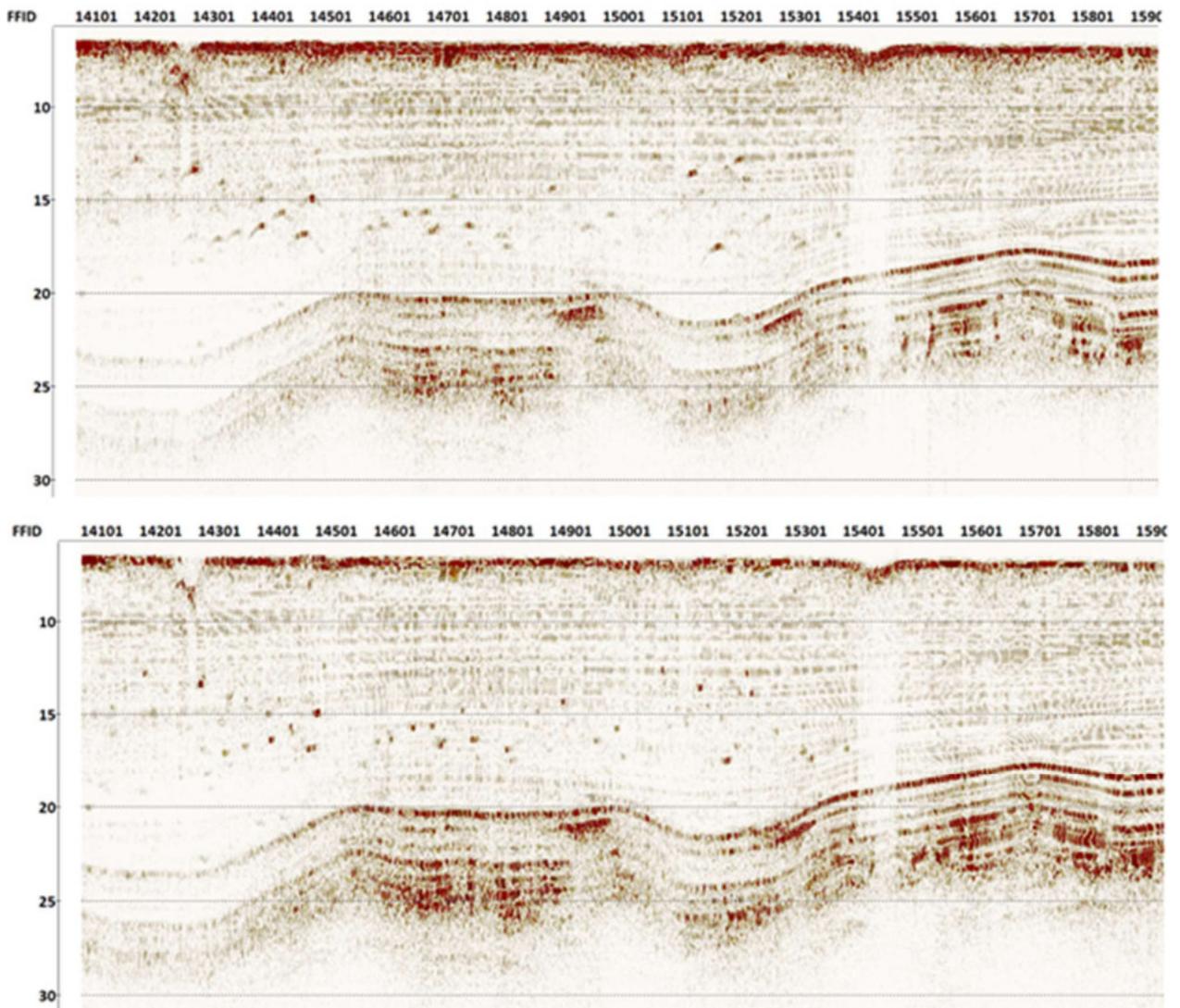


Рис.54 Пример данных профилографа до (сверху) и после (снизу) миграции Столта в FK области.

На завершающей стадии обработки к данным было применено преобразование Гильберта (Рис.55). Данная процедура позволяет получить огибающую сейсмических импульсов вместо большого количества ревербераций. Это полезно при дальнейшей интерпретации данных профилографа.

После проведения всех вышеперечисленных процедур данные экспортировались в формате SEG-Y на жесткий диск компьютера для дальнейшей интерпретации.

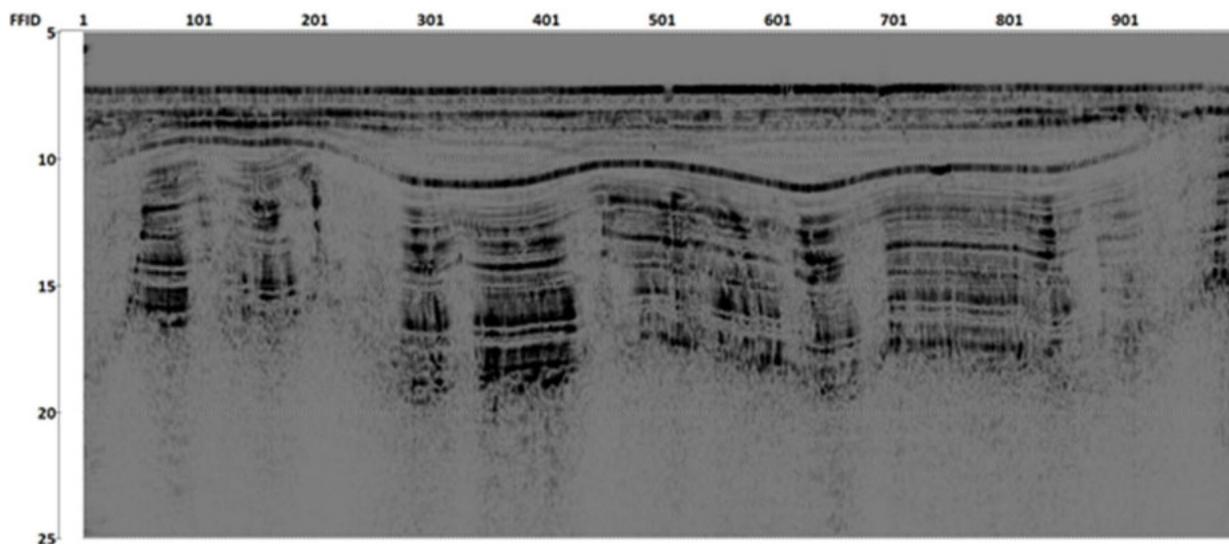


Рис.55 Данные акустического профилирования после применения преобразования Гильберта.

В результате обработки данные профилирования были подготовлены к дальнейшей сеймостратиграфической интерпретации, были устранены некогерентные шумы, и восстановлена форма границ и объектов. Данный метод позволил перейти к детальному изучению верхней части разреза. Высокая вертикальная разрешающая способность (до 10 см) позволила сопоставить данные геофизики с результатами геологического пробоотбора.

Таким образом, в результате обработки геофизических данных стандартным набором методов удалось получить разрезы нулевых удалений, геоэлектрические разрезы и мозаику ГЛБО для Петрозаводской губы Онежского озера. К особенностям графа обработки стоит отнести процедуры, связанные с восстановлением геометрии наблюдений при работе с заглубленной приемно-излучающей системой.

Полученные материалы будут применены для определения физических свойств осадков, сейсмофациальной, сеймостратиграфической и геоморфологической интерпретации, а также для идентификации опасных геологических процессов и явлений на исследуемой площади. Подробнее об этом будет рассказано в последующих главах.

Выводы главы 4. Сформированный программно-аппаратный геофизический комплекс для пресноводных акваторий продемонстрировал высокую результативность по качеству и кондиционности получаемых полевых материалов. В результате обработки геофизических данных удалось получить уникальные материалы для геологической интерпретации, позволяющие определить строение и физические свойства четвертичных отложений Петрозаводской губы Онежского озера.

Глава 5. Геологическая интерпретация

Целями исследований является изучение особенностей строения четвертичных отложений Петрозаводской губы Онежского озера. В диссертации решались различные геологические задачи: сейсмостратиграфическая интерпретация геолого-геофизических данных, определение физических свойств осадков, геоморфологический анализ дна озера и идентификация опасных геологических процессов и явлений (ОГПЯ). Для проведения камеральных исследований использовались данные, полученные на полевом этапе на акватории Петрозаводской губы Онежского озера аппаратно-программным комплексом, подробно описанным в предыдущих главах.

5.1 Сейсмостратиграфическая интерпретация данных

Одной из главных задач проведенных исследований являлось сейсмостратиграфическое расчленение толщи четвертичных отложений. По устоявшимся взглядам, изложенных в работах Лисицына, Рыбалко и других ученых, в северо-западном регионе при интерпретации использовалась определенная последовательность выполнения интерпретационных работ. В начале выделялись сейсмостратиграфические комплексы (региональные) с использованием государственной геологической карты масштаба 1:1000000 лист Р-36. Далее выделялись локальные сейсмостратиграфические единицы и проводилось сопоставление выделенных комплексов со стратиграфическими образованиями. Пример сейсмостратиграфического расчленения четвертичных отложений приведен на Рис.56.

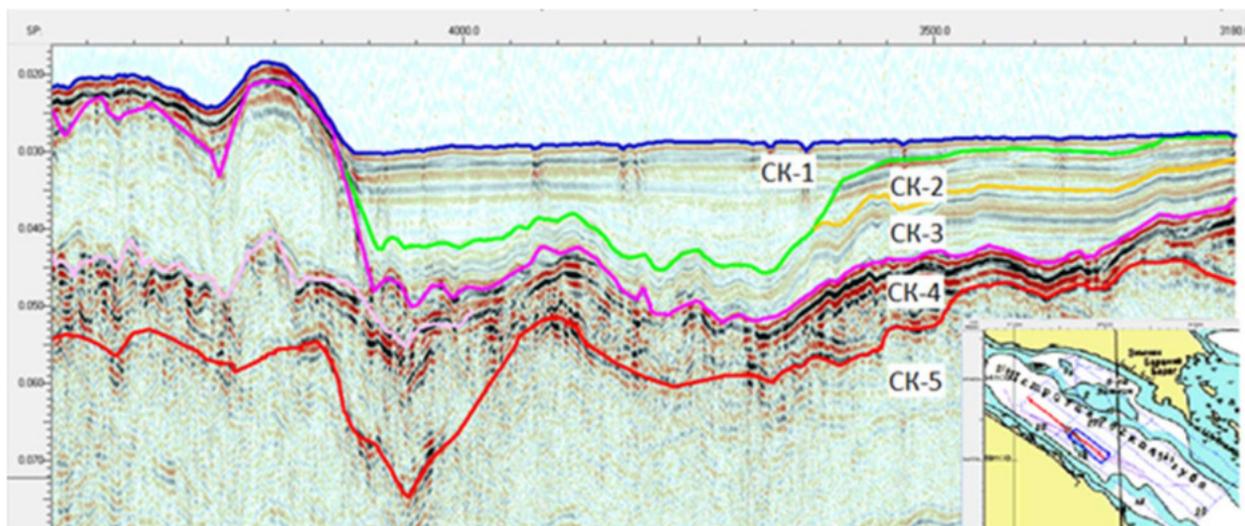


Рис.56 Сейсмограмма ОГТ, полученная по профилю, расположенному в центральной акватории Петрозаводской губы. Цветными линиями показаны границы сейсмокомплексов СК-1, СК-2, СК-3, СК-4, СК-5. Возраст комплексов приведен в тексте.

На приведенной выше сейсмограмме выделены следующие сеймостратиграфические единицы (сверху-вниз):

- СК-1. Заключен между поверхностью дна озера и кровлей СК-2. Комплекс характеризуется акустически прозрачной волновой картиной и представлен толщей с относительно небольшой мощностью (от 0 м до 3 м). Распространен не повсеместно. В разрезе представлен глинистыми алевритами оливково-серого цвета, жидкими. В верхней части присутствуют частицы слюды и растительный детрит, в нижней - проявляется полосчатость и примазки гидроокислов марганца. В основании комплекса иногда присутствует горизонт мелкозернистого глинистого песка.
- СК-2. Характеризуется полупрозрачной волновой картиной со слабо проявленной волнистой слоистостью. Глубина залегания кровли комплекса варьируется от 12 до 32 м. Мощность комплекса изменяется от первых метров до 28 м в наиболее глубоких участках площадки. Распространен не повсеместно. Представлен ленточными глинами серого цвета, мягко-пластичными. Наблюдается слоистость, близкая к ритмичной. Присутствуют слои алевропелитов и глинистых алевритов серого цвета с включениями песчаного материала. Сейсмокомплекс сопоставляется с озерно-ледниковыми ленточными глинами осташковского горизонта (lgIIIos).

- СК 3 ограничен в подошве и кровле динамически выраженными рефлекторами и имеет выдержанное простираие по положительной фазе. Характеризуется ярко выраженной волновой картиной с четкими параллельными осями синфазности средней и низкой амплитуды. Внутри комплекса наблюдается изменчивость интенсивности отражений по латерали.

Представлен глинами серого цвета микрослоистыми, мягкопластичными с линзами песчаных алевроитов и примесями тонкозернистого песка. В подошве горизонта представлен песком серым, глинистым с обломками дресвы. Сейсмокомплекс сопоставляется с ледниковыми отложениями осташковского горизонта.

- Кровля СК 4 является хорошо динамически выраженным рефлектором с неровной поверхностью. Волновая картина комплекса характеризуется наличием в верхней части высокоамплитудных параллельно слоистых осей синфазности. В нижней части слоистость начинает теряться и становится более хаотичной. Глубина залегания кровли комплекса варьируется от 15 до 74 м. Мощность изменяется от первых метров до 22 м в центральной части площадки. Предположительно, комплекс соответствует ледниковым моренным отложениям осташковского горизонта и представлен валунными суглинками. В центральной части площадки в кровле комплекса локально выделяется сейсмофация, характеризующаяся переменной мощностью (0-15 м) и прозрачной волновой картиной. Кровля сейсмофации повторяет форму поднятий, выраженных в рельефе дна, что подтверждается данными гидролокации, при этом ее подошва субгоризонтальна либо имеет рельеф, не соответствующий рельефу кровли. Предположительно, сейсмофация соответствует флювиогляциальным отложениям осташковского горизонта и представлена песками алевроглинистыми бурыми с большим количеством дресвы кристаллических пород (Рис. 57).

- СК 5 представляет акустический фундамент, кровля которого имеет неровный характер. Комплекс характеризуется хаотической волновой картиной и отличается от вышележащей толщи значительным уменьшением амплитуды отраженной волны. Глубина

залегания подошвы комплекса варьируется от 15 до 74 м. Предположительно сложен интенсивно метаморфизованными шокшинскими кварцитами.

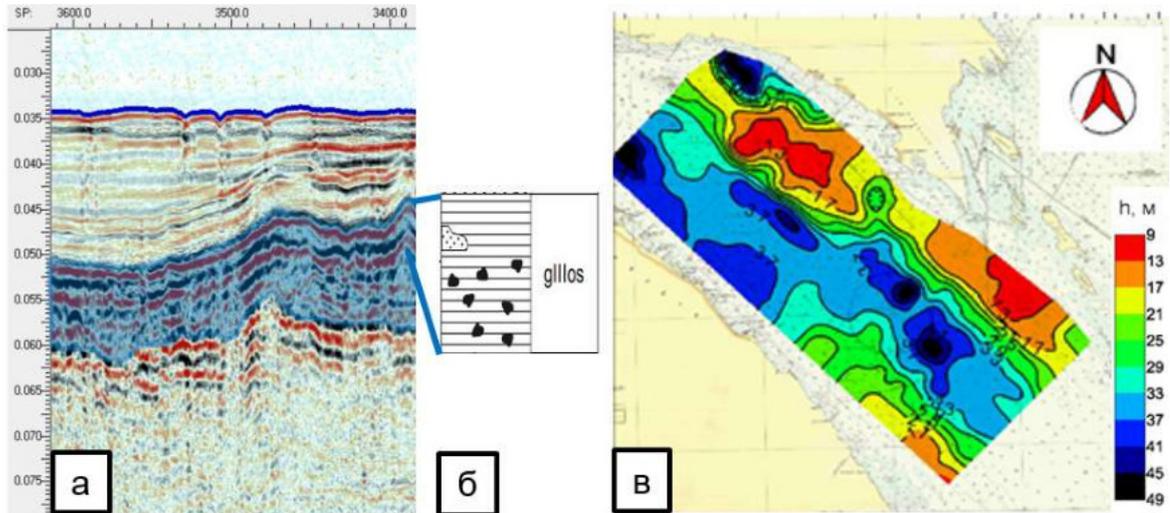


Рис.57 Пример схем, полученных в ходе интерпретации разреза четвертичных отложений: а) фрагмент профиля ССВР с выделенным СК-4 (синим); б) литологическая колонка, отобранная из СК-4 в) структурная карта кровли СК-4.

Анализ структурных особенностей каждого из представленных сейсмокомплексов позволил сделать вывод, что в пространственной характеристике четвертичных суммарной мощности четвертичных отложений Петрозаводской губы можно выделить участки с различными значениями мощностей. Из структурных построений отчетливо видно, что минимальные мощности четвертичных отложений фиксируются в северо-восточной части исследуемой акватории, максимальные – в северо-западной и центральной частях озера (Рисунок 58).

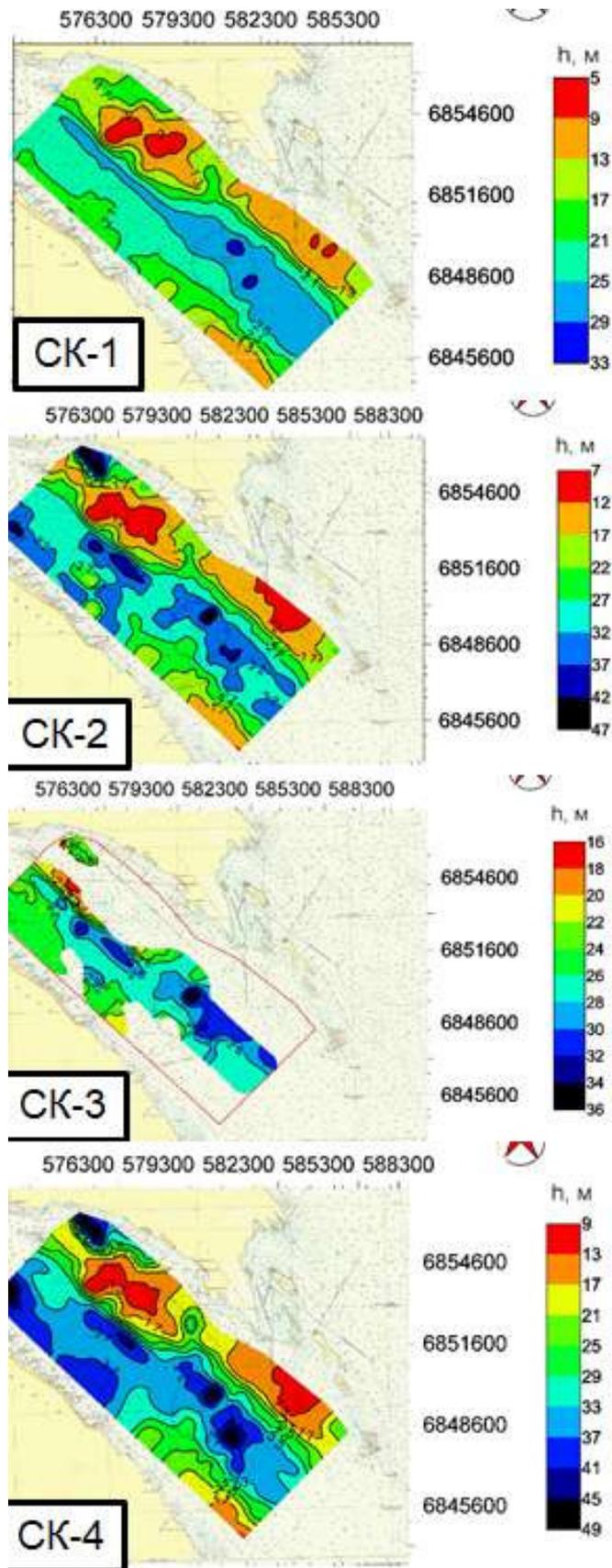


Рисунок 58. Результат площадных структурных построений исследуемой акватории Петрозаводской губы, выполненных по каждому из выделенных сейсмоакустических комплексов четвертичных отложений.

Дополнительная информация для литостратиграфического расчленения донных отложений и характеристики подводных ландшафтов получена при интерпретации записей профилографа (Рис.59).

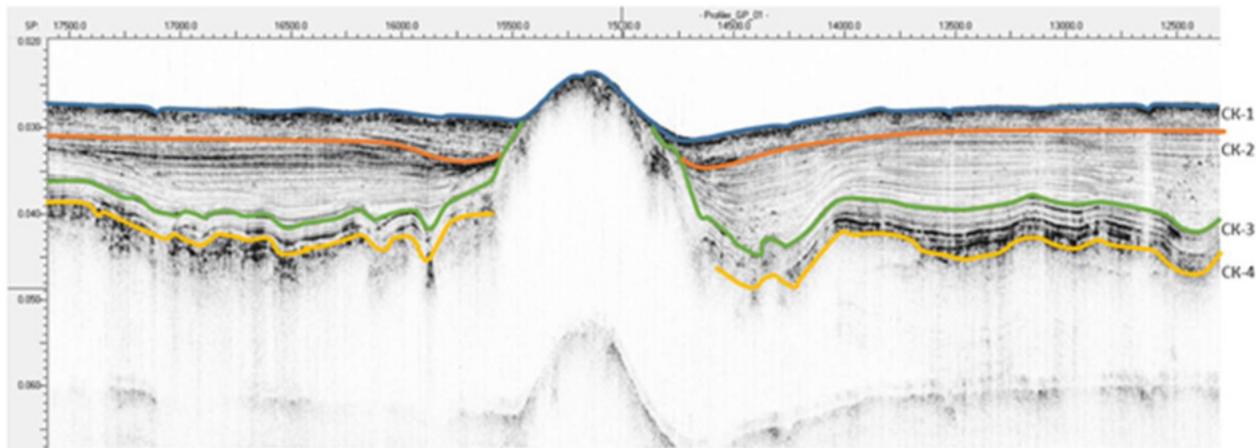


Рис.59 Пример разреза, полученного акустическим профилографом. Цветом выделены сейсмокомплексы 1-4.

На записи практически отсутствует сигнал ниже кровли моренных отложений СК-4, т. е. морена для данной модели профилографа является акустическим фундаментом. Это связано с большой плотностью неоднородностью ледниково-озерных осадков, что приводит к ослаблению высокочастотного акустического сигнала. В структуре озерно-ледниковой толщи СК-3 четко выделяются две пачки: нижняя, особенностью волновой картины которой является наличие относительно мощных парных слойков и верхняя полупрозрачная с тонкой облекающей слоистостью. Первая из них предположительно отражает начальную (проксимальную) стадию развития приледникового бассейна, а верхняя – стадию зрелого озера, существовавшего в позднем неоплейстоцене, когда уже сформировался сток в Ладожское озеро (Потахин и др., 2016).

К востоку, когда мощность ледниково-морских осадков существенно снижается, изменяется и характер отражающего горизонта, идентифицированного как кровля СК-2. Яркость отражения от этого отражающего горизонта существенно возрастает, что указывает на увеличение акустической жесткости. Вероятно, это связано с увеличением содержания песка, а граница - с размывом и сокращением разреза подстилающих глин.

Примерно так же выглядит и поверхность озерного дна (самый верхний отражающий горизонт). В восточной части, где практически к самой поверхности дна подходит нижняя пачка ледниково-озерных глин, резко возрастает и акустическая жесткость. Это связано с изменением литологии донных осадков: к северо-западу развиты преимущественно пелиты и алевропелиты, которые на поднятии подстилающих горизонтов сменяются песками. Происходит существенное изменение и биологической составляющей донных ландшафтов, т.к. они находятся в тесной связи с составом донных отложений. Таким образом, сейсмоакустическое профилирование в

Петрозаводской губе с двумя разночастотными (ССВР и СУВР) сейсмоакустическими системами позволило составить схему сеймостратиграфии четвертичных отложений Онежского озера и произвести геологическую интерпретацию сейсмоакустических данных (Рис.57).

В 2019 г. вышеописанная методика комплексных геолого-геофизических исследований была применена в новом районе исследований Онежского озера (Рис.60). Эти исследования подтвердили достоверность результатов сеймостратиграфической интерпретации, выполненной автором в рамках диссертационной работы.

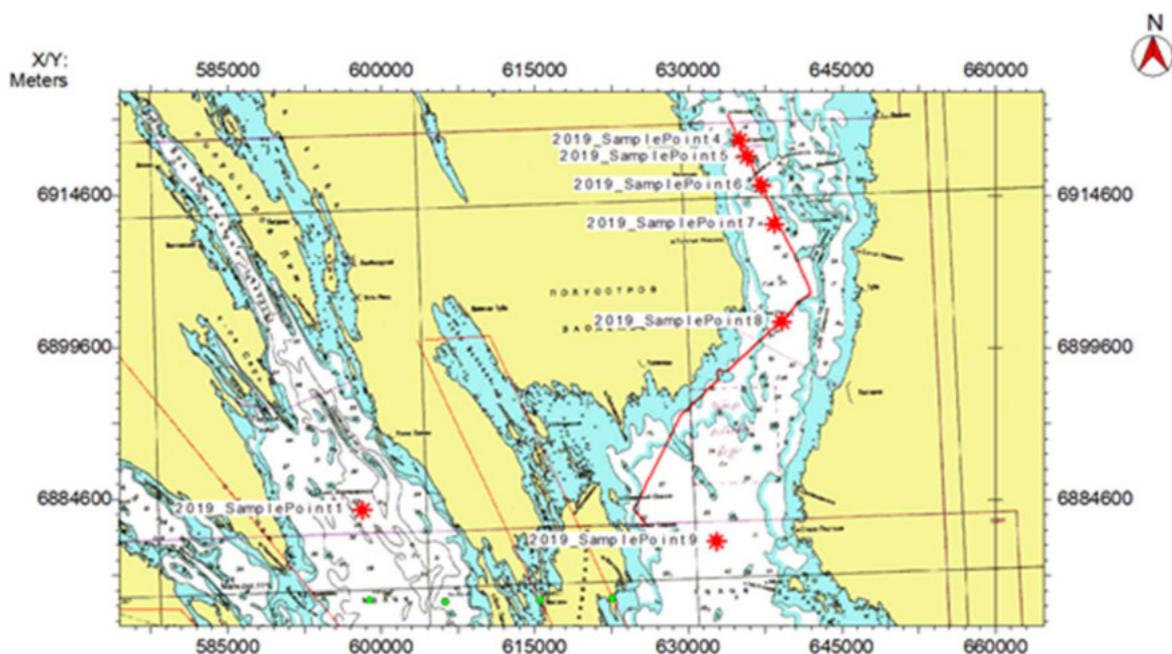


Рис.60 Карта фактического материала геолого-геофизической съемки 2019 г. в северной части Онежского озера (красными звездами отмечены точки геологического проботбора, а красной линией - профили ССВР).

Геологическая интерпретация данных сейсмоакустики показала, что предложенная автором схема сеймостратиграфии для Петрозаводской губы полностью согласуется с региональной сеймостратиграфической легендой (геологическая карта масштаба 1:1000000 лист Р-36). Она может быть использована и для идентификации слоев на сейсмограммах и в других районах Онежского озера.

Также в ходе исследований северной части Онежского озера, были подтверждено наличие мощной толщи четвертичных осадков и присутствие в ней газонасыщенных осадков (Рис.61).

Подробное описание разрезов, полученных в других частях Онежского озера были опубликованы в 2021 году (Алёшин, 2021¹).

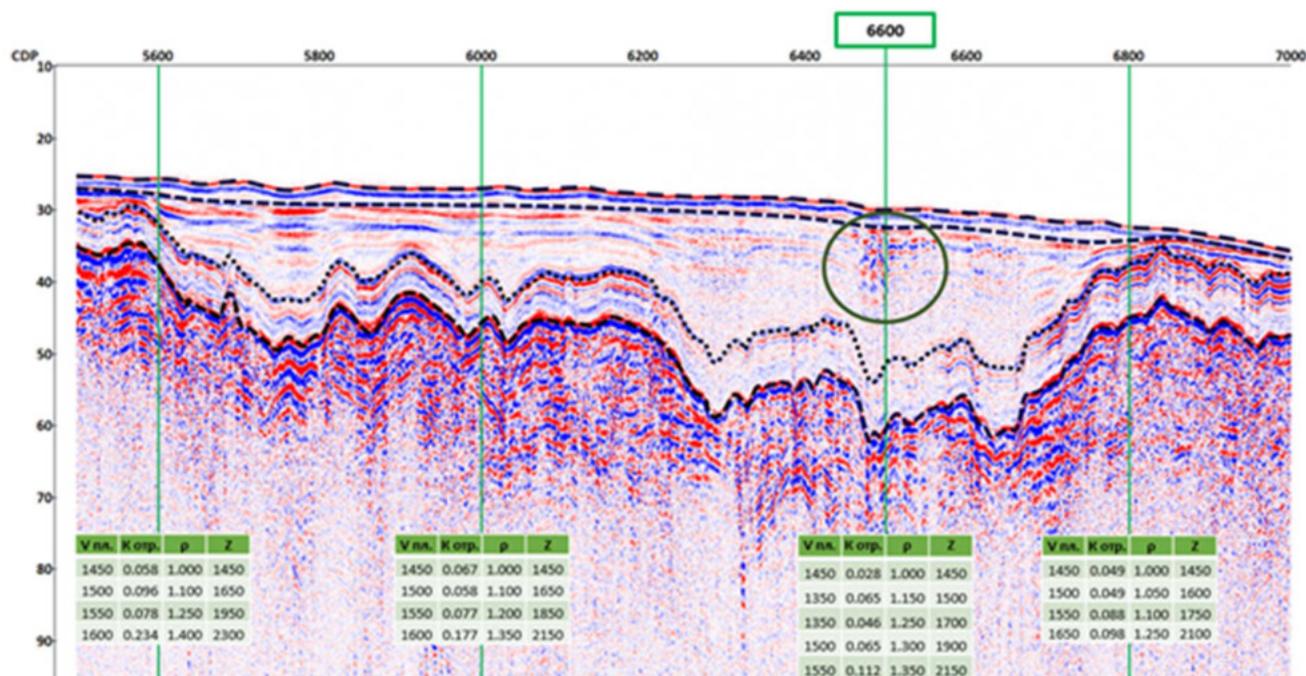


Рис.61 Фрагмент сейсмоакустического разреза с выделенным газонасыщенным участком (зеленый круг), полученного в северной части Онежского озера (пунктирными линиями выделены границы сейсмокомплексов). Для четырех точек рассчитаны таблицы физических свойств по каждому комплексу: коэффициенты отражения, плотности и импедансы.

В результате проведенной сейсмостратиграфической интерпретации была составлена сейсмостратиграфическая схема отложений Петрозаводской губы, которая была распространена на все Онежское озеро. Она была ранее внедрена во ВСЕГЕИ для уточнения государственной геологической карты масштаба 1:1000000. Полученные схемы и карты включены в состав

¹ 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. Алёшин М.И., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Миринец А.К. Результаты комплексирования геолого-геофизических методов с целью определения структуры и свойств придонных осадков Петрозаводской губы Онежского озера // Геофизика. — 2021. — № Спецвыпуск. — С. 30–41. RSCI Импакт-фактор в РИНЦ: 0.43 (1.27 п.л., авторский вклад 65%);

2. Алёшин М.И., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. Изучение придонных осадков в Петрозаводской губе Онежского озера с помощью комплексирования геолого- геофизических методов изучения донных отложений // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2019. – № 4. – С. 98-104. RSCI. Импакт-фактор в РИНЦ: 0,411. (0.69 п.л., авторский вклад 55%)

3. Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V., Belkina N., Tokarev M., Potakhin M., Aleshin M., Belyaev P., Dubois N., Kuznetsov V., Korost D., Loktev A., Shalaeva N., Kiskina A., Kostromina N., Kublitskiy Y., Orlov A. Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // Minerals. – 2020. – V. 10. – № 11. – P. 964-984. DOI: 10.3390/min10110964. Импакт-фактор в РИНЦ: 0.161; SJR: 0.522 (2.31 п.л., авторский вклад 10%)

4. Beliaev P., Rybalko A., Subetto D., Tokarev M., Aleshin M. Structure-geomorphological features of the largest lakes of Russian North-West // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – № 4. – P. 515-516. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-515 (0.23 п.л., авторский вклад 10%)

монографии (Субетто Д.А., 2022). Было установлено, что четвертичный покров Петрозаводской губы Онежского озера подразделяется на четыре стратиграфических комплекса, перекрывающих докембрийский кристаллический фундамент: 1. Средне- и верхне-голоценовые озерные илы и гитии; 2. Нижне-голоценовые озерные илы гомогенизированные и глины; 3. Озерно-ледниковые ленточные глины осташковского горизонта; 4. Ледниковые отложения и флювиогляциальные пески осташковского горизонта.

5.2 Количественная оценка физических свойств.

Лабораторные исследования керна геофизическими методами позволили получить количественную оценку скорости звука в осадках, полученных в ходе геологического пробоотбора. По результатам измерений были собраны данные в цифровом формате. Обработка полученных данных выполнялась в пакете RadExPro. Для загрузки данных в проект файлы данных, сохраняемые с помощью осциллографа, конвертировались в SGY-файлы. Далее выполнялась загрузка данных в проект RadExPro и присвоение геометрии (координата точки измерения вдоль трубки). Затем производилась визуализация и анализ зарегистрированных сейсмотрасс (Рис.62).

Основной процедурой, выполняющейся в ходе обработки является определение времени вступления продольной волны. Расчет скорости V_p осуществлялся по следующей формуле:

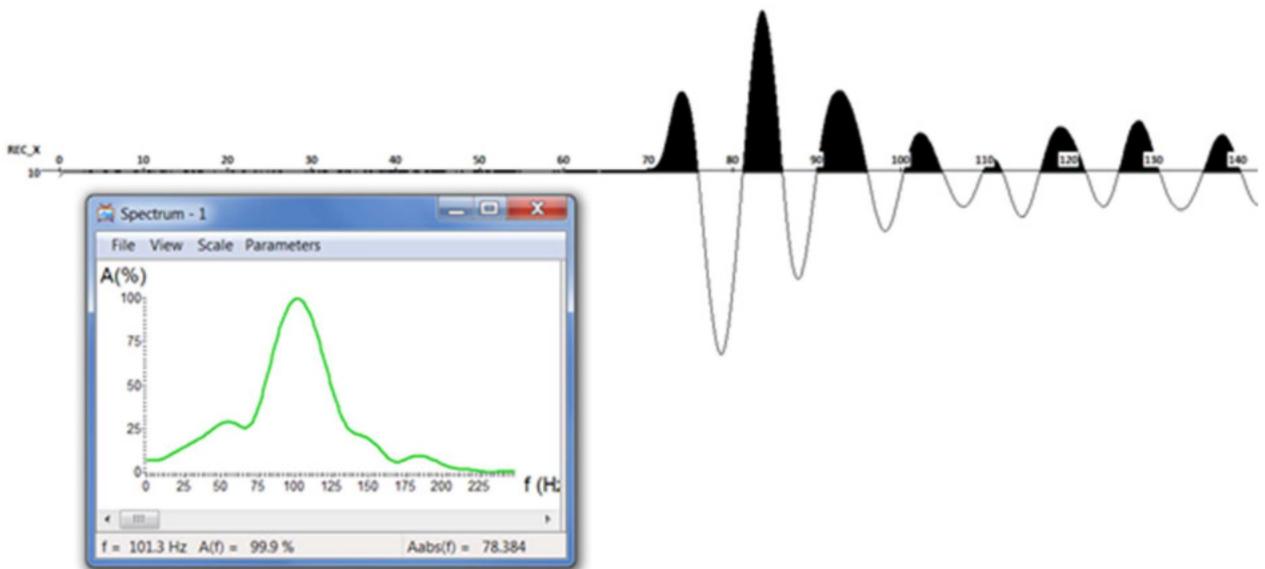


Рис.62 Пример исходной сейсмотрассы и спектр импульса P-волны.

Здесь l – расстояние, преодолеваемое волной в массиве осадка (толщина стенок трубки 1.5 мм, толщина слоя породы 107 мм);

- $t_{изм}$ – время прихода волны, определенное по записи;

- Δt – задержка прибора (1.0 мкс);
- t_{mp} – время, затрачиваемое волной на преодоление стенок трубки. С учетом скорости звука в материале трубы (ПВХ) 2000 м/с и толщины трубки (2x1.5 мм) $t_{mp} = 1.5$ мкс.

Таким образом были рассчитаны скорости для всех точек измерений. Измерения были проведены на кернах, полученных результате пробоотбора с борта судна и бурения со льда. Отдельной графой указаны скорости распространения продольных волн в образцах, содержащих газонасыщенные осадки (Таблица 12).

Таблица 12 Результаты измерений скорости продольных волн на образцах.

Сейсмокомплекс	V_p , м/с
СК1	1330-1410
СК1-2 (Газонасыщенный)	1270-1340
СК2	1340-1430
СК3	1430-1520

Подбор коэффициентов отражения (без учета поглощения)

Для решения задачи определения инженерно-геологических условий и идентификации опасных геологических процессов и явлений на акватории Петрозаводской губы по геофизическим данным были произведены расчеты различных сейсмических атрибутов. В данной главе показаны особенности обработки данных для последующей количественной оценки свойств пород, показаны результаты расчета следующих атрибутов: пластовые скорости продольных волн, коэффициенты отражения, импеданс и плотности пород.

Для подбора коэффициентов отражения использовались данные, полученные заглубленной сейсмоакустической системой. Сейсмический излучатель и приемная коса буксировались на глубине порядка 10-15 метров. Это позволило добиться того, что волны-спутники не искажают динамические характеристики сигнала, приходящего от дна и первых поддонных границ. Соответственно, после ввода коррекции амплитуд за геометрическое расхождение волнового фронта и учитывая геометрию расстановки, можно делать выводы об амплитудных характеристиках, полученных данных.

После восстановления геометрии наблюдений, описанной в предыдущей главе, происходило шумоподавление такими процедурами, как полосовая фильтрация в частотной области, устранение постоянной составляющей в данных и пространственная фильтрация во временной области (Рис.63, Рис.64).

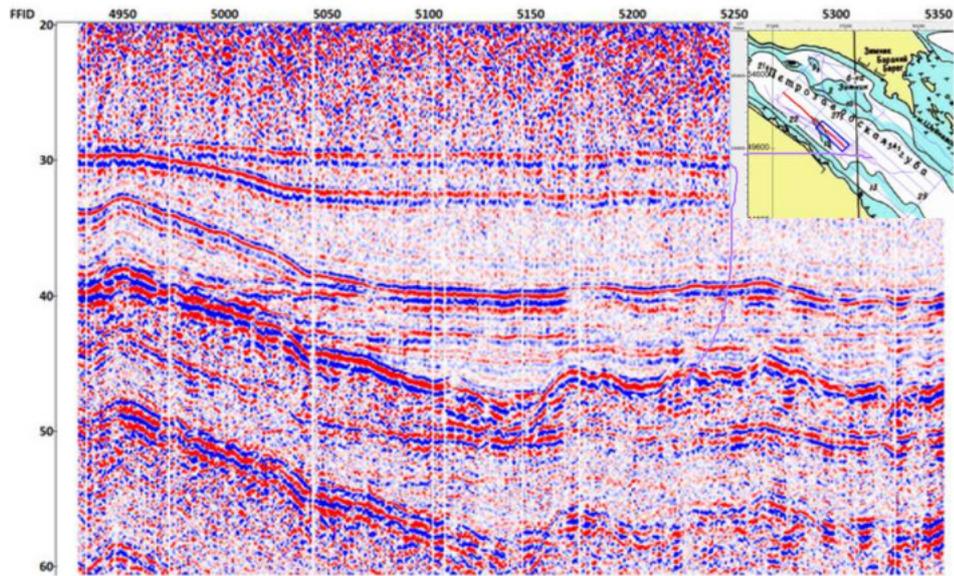


Рис.63 Профиль S-09 (красная линия), данные ССВР с заглубленной системой до фильтрации.

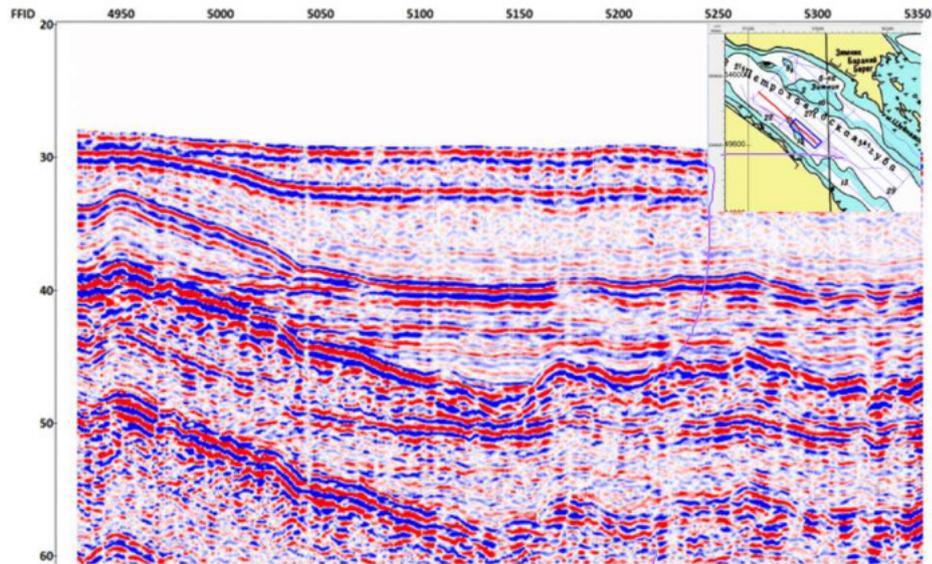


Рис.64 Профиль s-09, данные после предварительной обработки.

Следующим этапом после поканального подавления шумов являлась импульсная деконволюция (Рис.65). Данная процедура нацелена на уменьшения длительности сигнала и повышение вертикальной разрешающей способности. В качестве исходного импульса, подававшегося на вход оператора деконволюции, использовалась сигнатура прямой волны. Так как съемка производилась с заглубленной системой, импульс прямой волны имеет стабильные динамические характеристики. Таким образом, для каждого возбуждения импульс выбирался индивидуально.

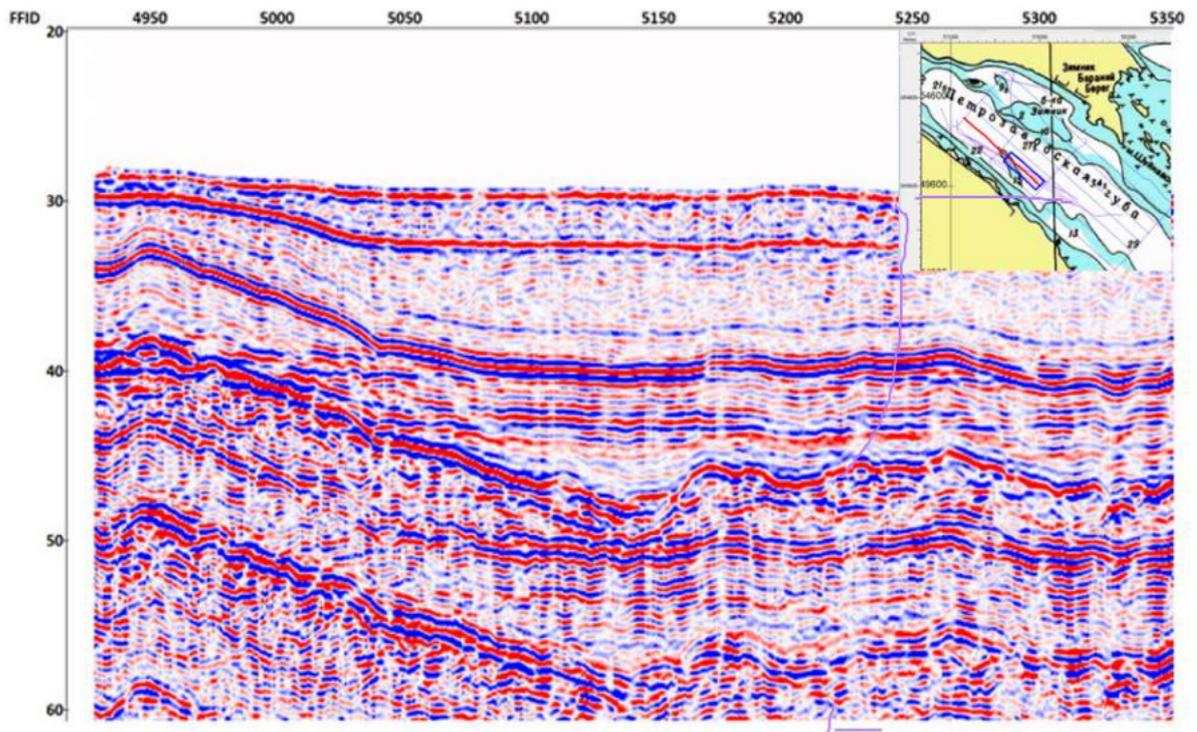


Рис.65 Профиль s-09, после применения импульсной деконволюции.

В результате деконволюции импульс сжался в 1.5-2 раза, что существенно увеличивает вертикальное разрешение. После поканального подавления шумов и импульсной деконволюции был произведен вертикальный скоростной анализ (Рис.66), ввод кинематических поправок и суммирование по ОСТ (Рис.67), что позволило получить информацию об эффективных и пластовых скоростях пород, а также увеличить соотношение сигнал/помеха и коррелируемость сейсмических горизонтов.

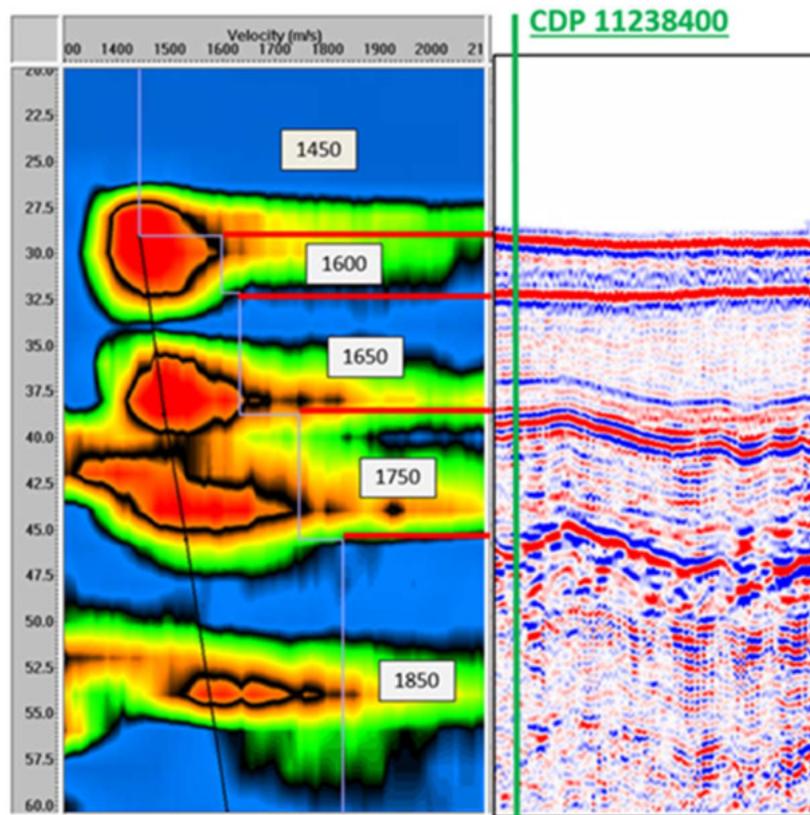


Рис.66 Пример скоростного анализа для точки ОСТ (CDP) 11238400.

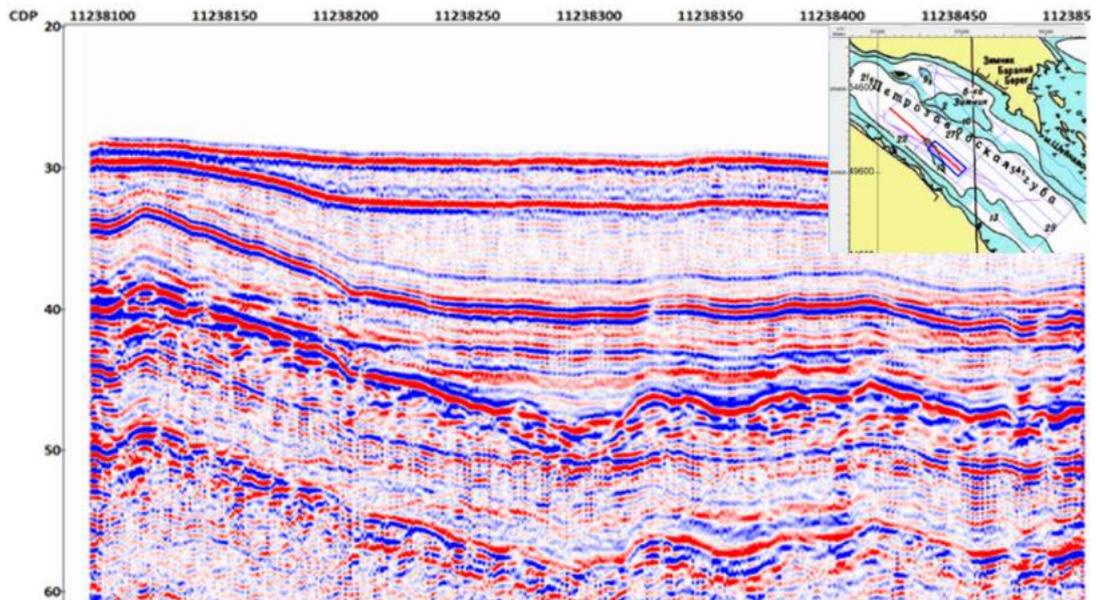


Рис.67 Участок профиля S-09 после суммирования по ОСТ

Финальным этапом подготовки данных к количественной интерпретации являлось подавление волн-спутников. Для выполнения данной процедуры использовались алгоритмы Sharp-Seis Deghosting программного пакета RadExPro, а также вычитание волновых полей. Из исходных данных формировалось модельное волновое поле, с учетом инверсии фазы и затуханием амплитуд, затем происходило адаптивное вычитание модельного поля волн-спутников из исходных данных (Рис.65).

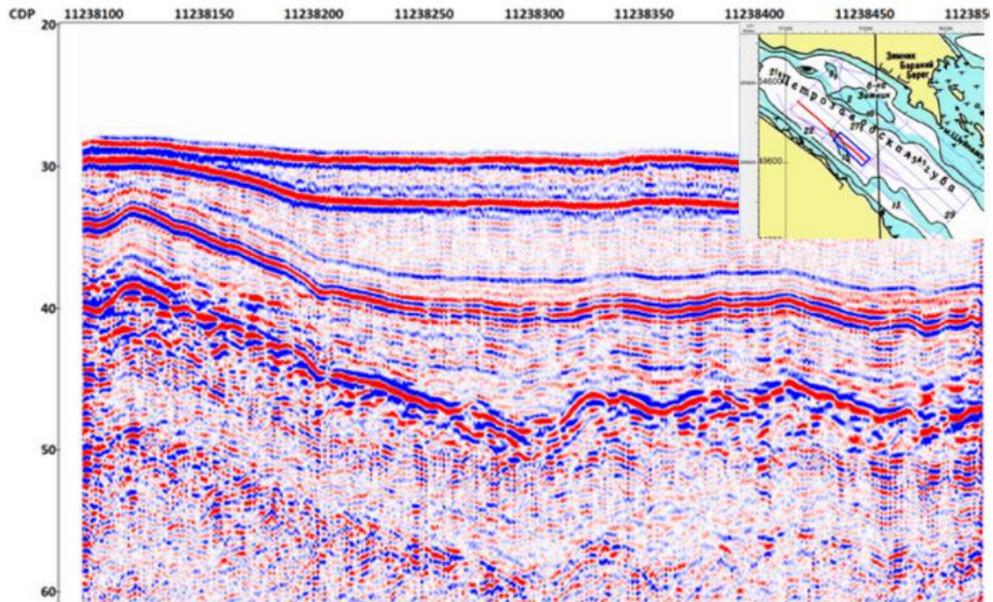


Рис.65. Участок профиля S-09 после подавления волн-спутников и кратных волн

В результате обработки данных, полученных с заглубленной системой, удалось увеличить соотношение сигнал-помеха в 10 раз и произвести удаление волн-спутников на протяжении всего профиля. Отдельно важно отметить, что на данных сейсмограммах в верхней части разреза отсутствуют волны спутники, которые оказывают значительное влияние на динамические характеристики записи отраженного сейсмоакустического сигнала. Благодаря этому, данные заглубленной системы возможно использовать для последующей оценки физических свойств осадка.

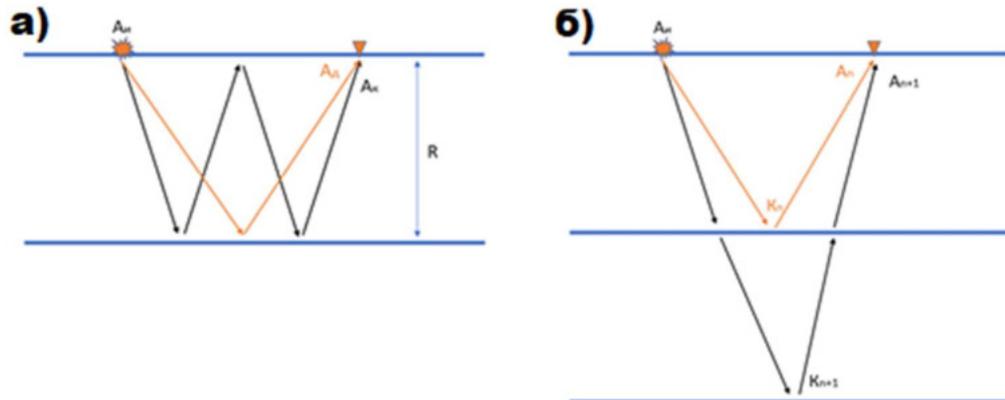


Рис.68 Схема пути, проделанного волной в горизонтально-слоистой среде. На первом рисунке (а) кратное и донное отражения, на втором (б) - в двух слоях с разной скоростью распространения звука.

Далее рассмотрим типичную задачу определения коэффициента отражения (K_d) от дна. Схематически изобразим положение источников и приемников, а также выделим цветом интересующие направления распространения волн (Рис.68). Пренебрегая поглощением в среде, найдем величину амплитуды сигнала, отраженного от дна (A_d):

$$A_d = A_n \frac{1}{2r} * K_d,$$

где A_n – излучаемая источником амплитуда, а K_d – коэффициент отражения от дна.

Величина же амплитуды кратной волны от дна (A_k) будет равняться:

$$A_k = A_n \frac{1}{4r} * K_d * K_d * (-1)$$

Решив систему из двух уравнений, вычислим:

$$K_d = -2 * \frac{A_k}{A_d}.$$

Аналогично для определения коэффициента отражения поддонных горизонтов с номерами n и $n + 1$ амплитуды отраженного сигнала можно выразить в виде:

$$A_n = A_n * K_n,$$

$$A_{n+1} = A_n * (1 - K_n) * K_{n+1} * (1 - (-K_n)),$$

где A_n - амплитуда отражения n -ого горизонта, а A_{n+1} - амплитуда отражения следующего горизонта.

Решив новую систему уравнений, получим, что коэффициент отражения K_{n+1} равен

$$K_{n+1} = \frac{A_{n+1} * K_n}{A_n * (1 - K_n^2)}.$$

Пользуясь данным выражением можно последовательно рассчитать значения коэффициентов отражений для прослеживаемых горизонтов. Далее, используя формулу для расчета коэффициента отражения при нормальном падении, легко рассчитать акустический импеданс и плотность пород, слагающих каждый и слоев (Рис.67).

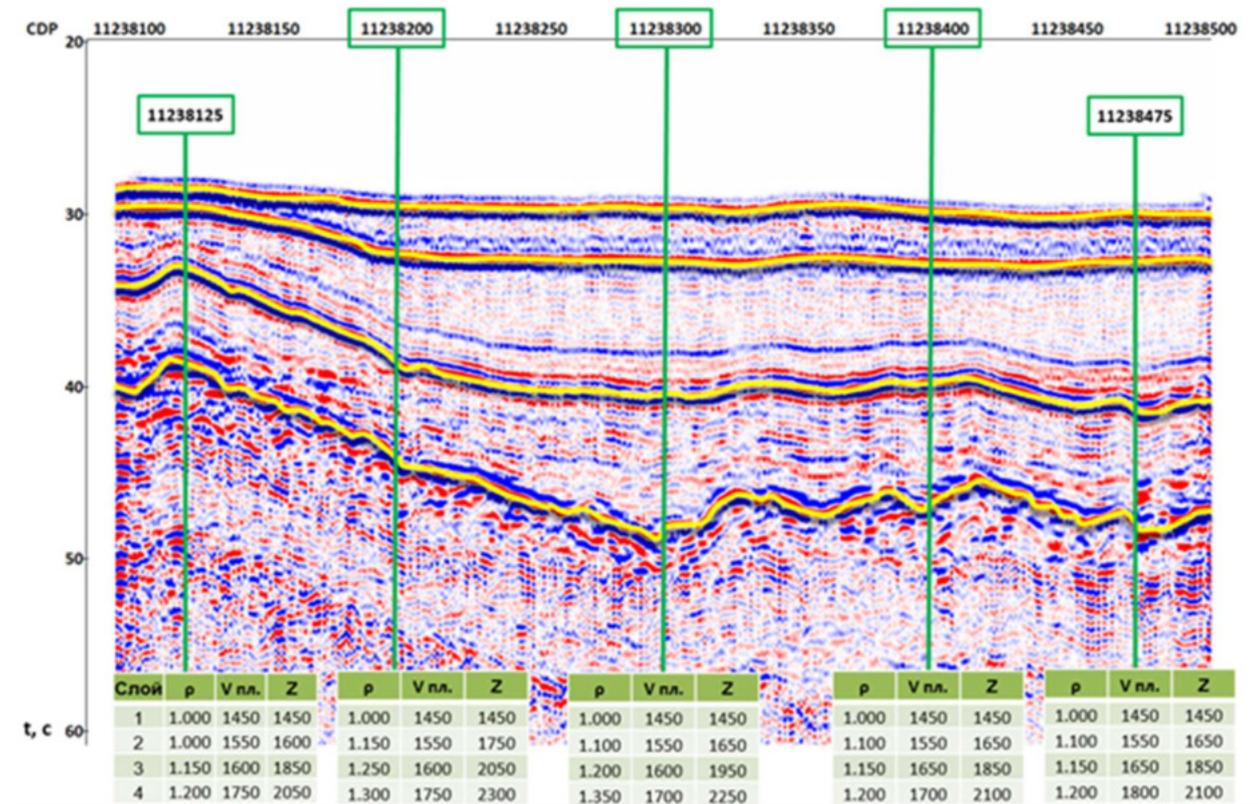


Рис.69 Таблицы физическими свойствами с рассчитанными по каждому из выделенных сейсмокомплексов (желтые линии).

В результате обработки сейсмоакустических данных с заглубленной системой удалось получить количественную оценку физических свойств осадков: скоростей распространения звука, плотностей, импедансов и коэффициентов отражения. На следующем этапе эти данные сопоставлялись и анализировались совместно с данными электротомографии. На основании скоростного закона, полученного в ходе горизонтального скоростного анализа, сейсмоакустические профили переводились из временного масштаба в глубинный. Затем на них накладывались геоэлектрические разрезы, полученные в ходе электромагнитной инверсии. Это позволило для каждого из выделяемых сейсмокомплексов определить не только акустические, но и электромагнитные свойства осадков (Рис.70).

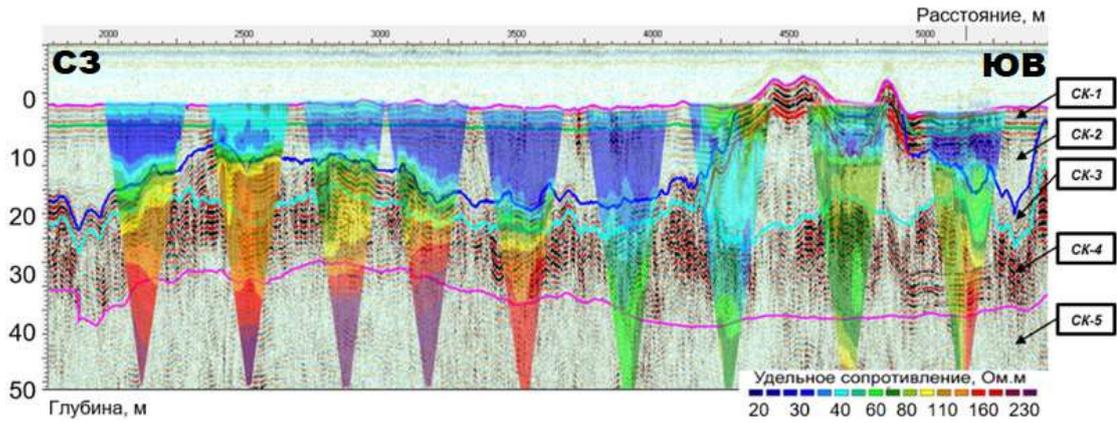


Рис.70. Сопоставление геоэлектрических разрезов, полученных по данным донной электротомографии с выделенными сейсмоакустическими комплексами (по материалам работы А. К. Миринец, А. А. Бобачева и А. Е. Рыбалко., 2022)

Затем по результатам измерений на керне и количественной интерпретации сейсмоакустических данных была построена сводная таблица, в которой приведены значения физических характеристик, характерных для осадочных пород Петрозаводской губы онежского озера (Таблица 13). Информация была получена для четырех сейсмокомплексов, выделяемых в осадочном чехле озера. Для СК-4 при этом данные кернов отсутствуют в связи с недостаточной глубиной скважины. В таблице приводятся значения, полученные как лабораторными методами, так и дистанционными геофизическими методами.

Таблица 13 Количественная оценка физических свойств осадков Петрозаводской губы Онежского озера

№	Сейсмо-комплекс	УЭС, Ом·м	Vp инт, м/с	Vp лаб, м/с	Плотность, г/см ³	К. отр.
1	СК-1	35 – 60	1520 – 1550	1330-1410	1.19 – 1.35	0.02-0.06
2а	СК-2	40 – 70	1340 – 1430	1270-1340	1.2 – 1.4	0.09-0.3
		30 – 60	1575 - 1610	1340-1430	1.2 – 1.4	0.05-0.09
3	СК-3	55 – 130	> 1700	1430-1520	1.2 – 1.6	0.15-0.24
4	СК-4	> 130	> 1910	-	-	-

Таким образом, сформированный программно-аппаратный комплекс позволяет получить детальную количественную оценку физических свойств донных осадков, слагающих верхнюю часть геологического разреза на пресноводных акваториях. Максимальная глубинность

исследований составляет 75 м, вертикальная разрешающая способность – до 0.1 м, горизонтальная разрешающая способность – 0.5 м. С помощью технологии, применявшейся на акватории Петрозаводской губы, были получены сведения о скоростях распространения звука в породе, удельных электрических сопротивлениях и плотностях сейсмокомплексов, слагающих осадочный чехол. Результаты исследований опубликованы в работах (Алёшин и др., 2020²).

5.3 Геоморфологический анализ данных

Геоморфологический анализ данных, полученных на полигоне Петрозаводской губы позволяет на основании геолого-геофизических данных перейти к решению задач экологических и ландшафтных исследований. Проведение подобных исследований в масштабе всего Онежского озера требует отработки методики на относительно небольшом участке. В роли такого участка была выбрана Петрозаводская губа.

Построение рельефа дна Петрозаводской губы производилось по данным сейсмоакустических и гидроакустических наблюдений различными методиками (Рис.71). Для этого в специализированном программном обеспечении производилось выделение времен первых вступлений в полуавтоматическом режиме. После этого производилось построение карты рельефа дна с помощью метода Криггинга. Для перевода карты из временного масштаба использовалась формула:

$$d = \frac{vt}{2},$$

где d – глубина, v = скорость звука в воде, t – время двойного пробега. Скорость звука в воде принималась равной 1500 м/с.

¹ 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. Алёшин М.И., Видищева О.Н., Валиева Э.И., Миринец А.К., Егошина Е.Д., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н. Четвертичные отложения открытой части Онежского озера и Заонежского залива // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 3. – С. 35-52. RSCI. Импакт-фактор в РИНЦ: 0,767. (1.85 п.л., авторский вклад 59%).

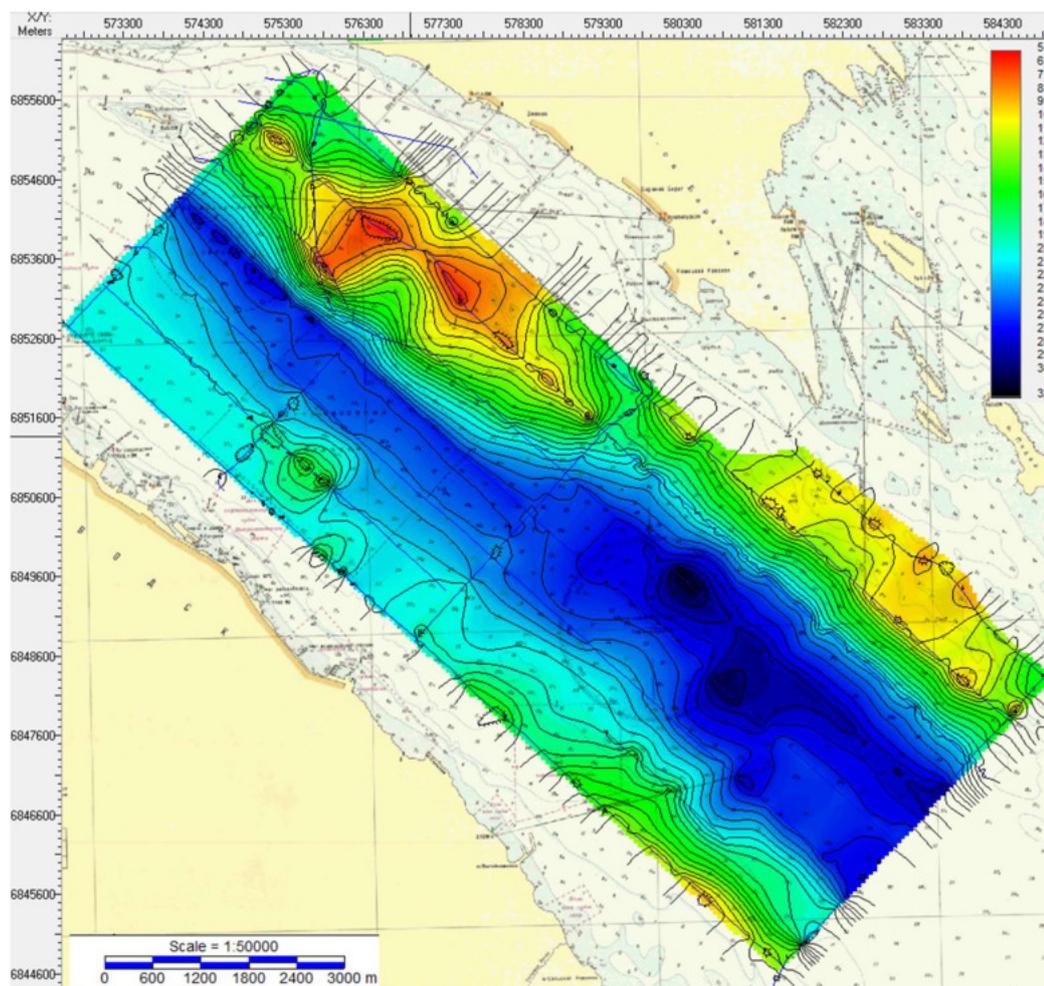


Рис.71 Цифровая модель рельефа дна Петрозаводской губы, построенная по данным сейсмоакустических и гидроакустических измерений.

В рельефе дна Петрозаводской губы отчетливо выделяются несколько типов подводных поверхностей: денудационно-структурной, аккумулятивно-денудационной и нефелоидно-аккумулятивной. Эти типы рельефа отличаются друг от друга как по характеру залегания осадков, так и по их составу. Изменение рельефа в разных частях полигона связано в первую очередь с отличающимся геологическим строением верхней части разреза, а также с интенсивностью процессов осадконакопления и денудации.

Рельеф структурно-денудационного типа поверхности дна. Интенсивно расчлененные грядово-увалистые и шхерные выступы на кристаллическом субстрате со следами проявления современных геодинамических процессов. Развиты в северной части Петрозаводского полигона, имеют достаточно высокую степень расчленения рельефа, характеризуются значительными перепадами глубин, в пределах развития данного типа подводной поверхности наблюдаются отмели. На данных сейморазведки выделяется как яркая протяженная отражающая поверхность, имеющая неровный характер залегания (Рис.72). В локальных понижениях наблюдаются скопления осадочных пород малой мощности, что не позволяет их выразить в масштабе геоморфологической карты.

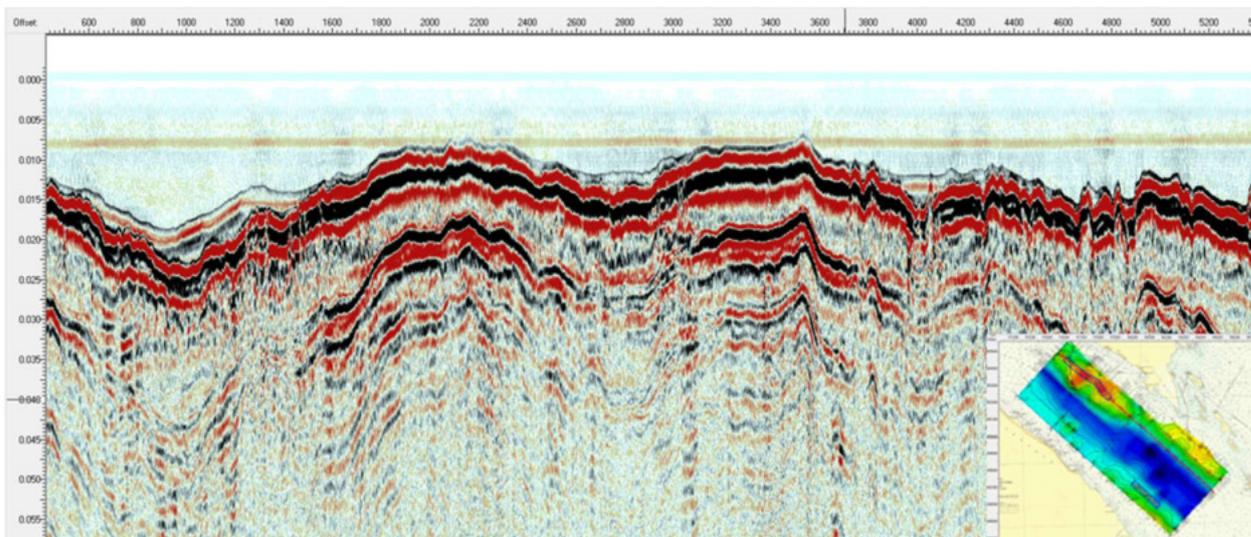


Рис.72. Пример волновой картины по данным СВВР, характерной для структурно-денудационной группы.

Рельеф аккумулятивно-денудационной группы представлен двумя основными типами. К **первому типу** относятся элементы ледниковых холмисто-западных равнин, залегающих на породах кристаллического субстрата, осложнённые аккумулятивными возвышенностями ледниковой природы. Распространены как в северо-восточной, так и в юго-западной части площадки, субпараллельно береговой линии. Развиты преимущественно у берега, выделяются по наличию структурно-предопределённых. На сейсмоакустических данных (Рис.73) характеризуется наличием высокоамплитудных параллельно слоистых осей синфазности в верхней части разреза. По данным гидролокации бокового обзора выделяется как поверхность с равномерной амплитудой рассеянного сигнала, на которой присутствуют текстурные особенности – следы траления и якорных цепей, а также редко встречаются изометричные понижения в рельефе глубиной до 1 м. – покмарки.

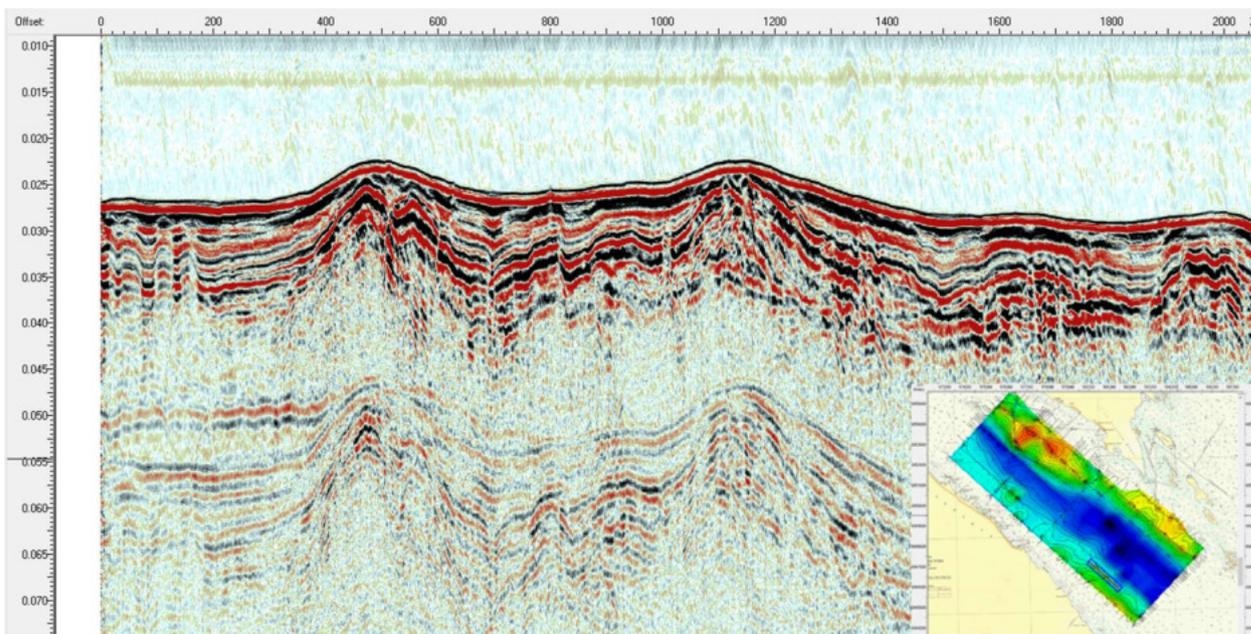


Рис.73 Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для ледниковой равнины, входящей в аккумулятивно-денудационной группу рельефа.

Второй тип представлен флювиогляциальными холмисто-грядовыми структурами на моренном субстрате (зоны краевых образований). В рельефе представлены локально в западной части Петрозаводской губы. Характеризуется средней расчленённостью рельефа. Присутствуют гряды и увалы, ледникового и водно-ледникового генезиса высотой до 7 метров. На данных сейсмоакустики (Рис.74) выделяются по яркому протяженному отражающему горизонту и прозрачной или полу-прозрачной волновой картине. По данным гидролокации четко выделяются как зоны повышенной амплитуды акустического сигнала, что свидетельствует об отличной от вмещающих пород, более шероховатой текстуре (Рис.75).

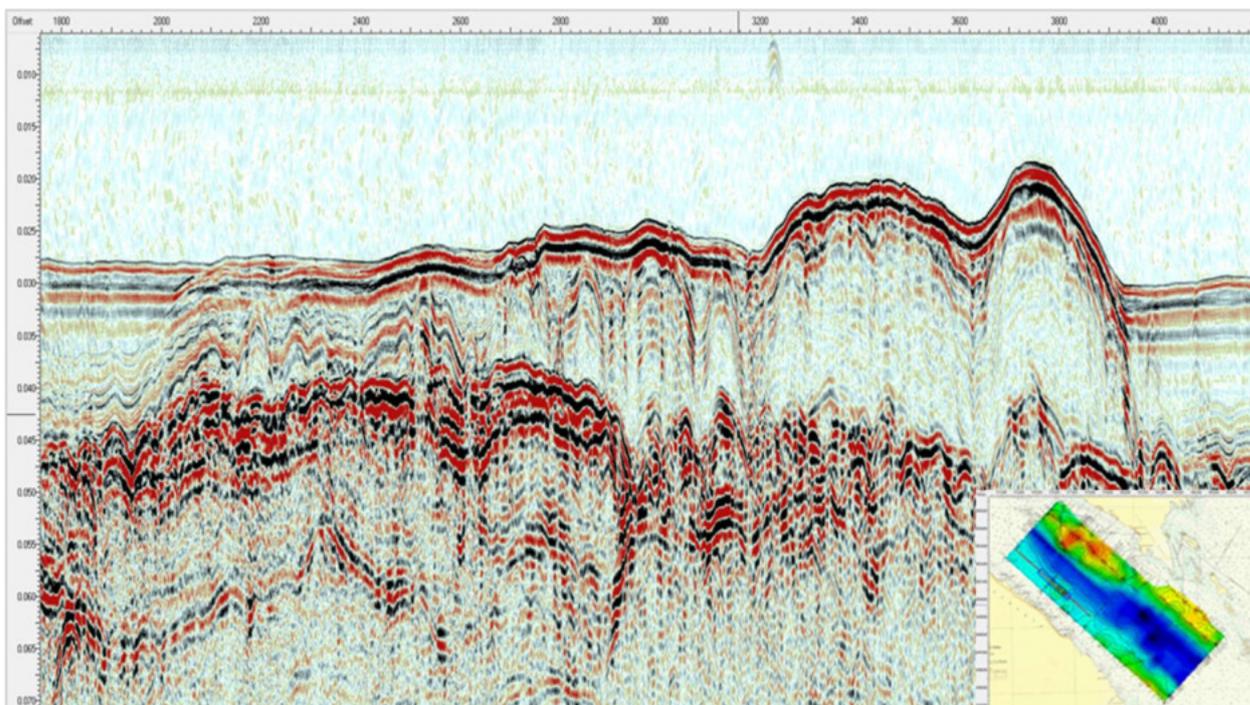


Рис.74. Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для флювиогляциальной холмисто-увалистой структуры, входящей в аккумулятивно-денудационной группу рельефа.

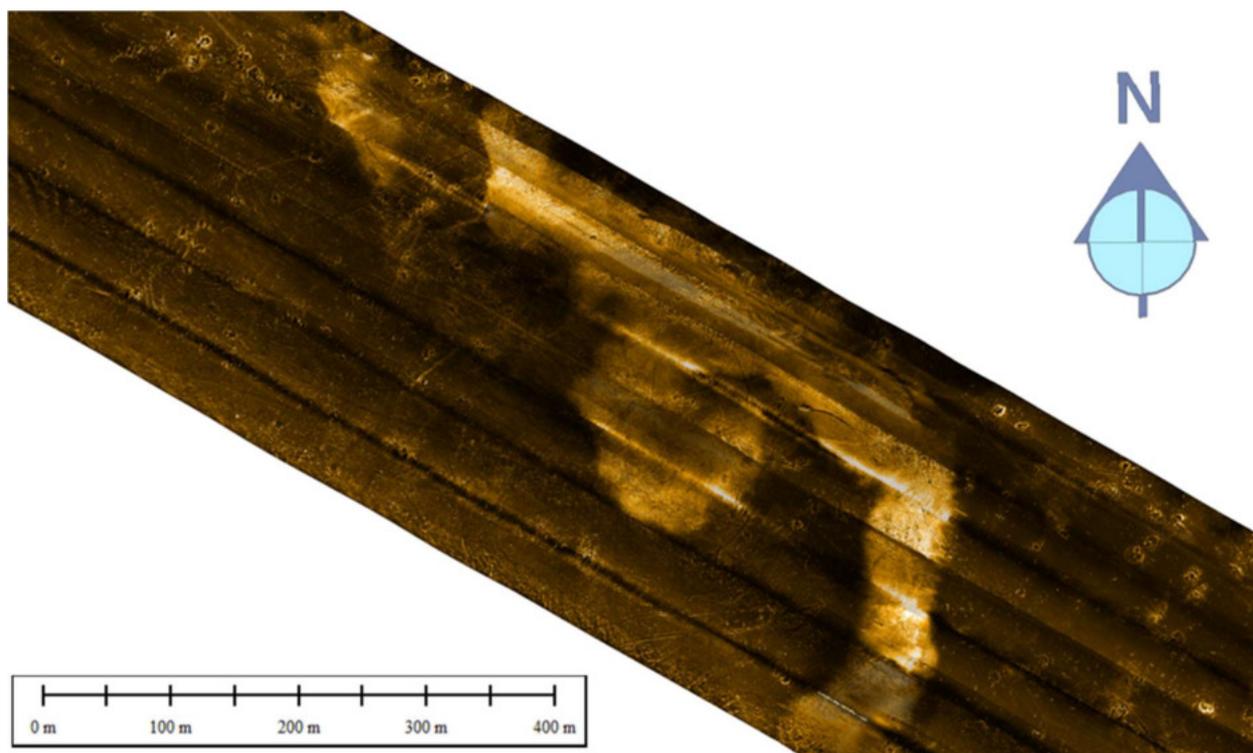


Рис.75 Пример сонограммы ГЛБО, характерной для флювиогляциальной аккумулятивно-денудационной группы рельефа. В центральной части выделяется флювиогляциальная холмисто-грядовая структура, окруженная ледниковой равниной. Светлым тонам соответствуют более высокие амплитуды.

Рельеф аккумулятивной группы тоже представлен двумя основными типами. Для **первого типа характерны** выровненные, местами всхолмленные, озерные нефлоидные равнины. Занимают среднюю, наиболее глубокую часть Петрозаводской губы. Характеризуются наименьшей степенью расчленения рельефа среди выделенных типов поверхности и максимальной мощностью озёрных отложений. На сейсмоакустических данных (Рис.76) выделяются как слабо отражающие слоистые толщи, часто наблюдаются следы газопроявлений в осадках. На данных гидролокации представлены поверхностями с слабыми амплитудами рассеянного сигнала, беспорядочно усеянными локальными изометричными в плане понижениями в рельефе – покмарками. Диаметр покмарок достигает 10 м, а глубина - 1.5 м (Рис.77).

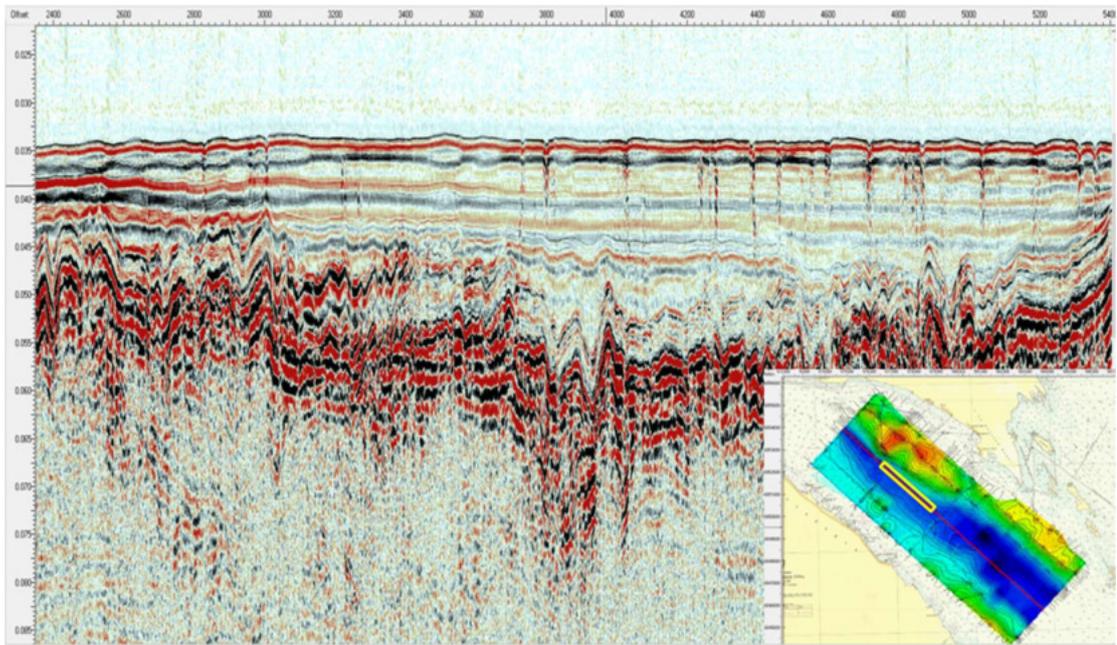


Рис.76. Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для озерно-нефелюидных равнин.

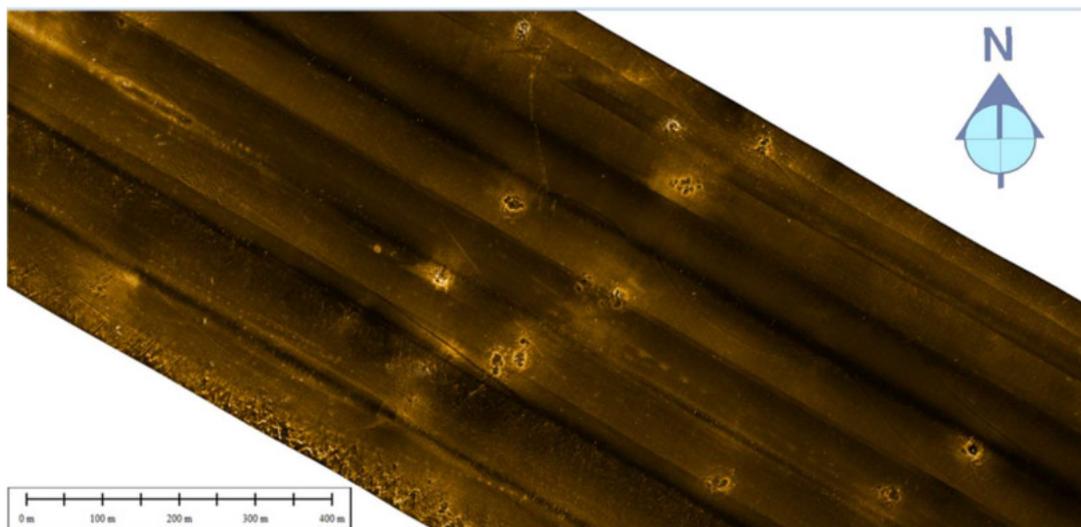


Рис.77 Пример сонограммы ГЛБО, характерной для озерно-нефелюидных равнин. Отчетливо выделяются как единичные, так и скопления изометричных понижений в рельефе – покмарки.

Второй тип - субгоризонтальные выположенные ледниково-озерные равнины. Занимают центральную и южную части озера. Глубины – от 10 до 70 метров. Рельеф слабо расчленён, превышения незначительны. По своей сути, являются аккумулятивными полями, образованными аккумуляцией, характерных для приледниковых водоёмов. На сейсмических данных (Рис.78) выделяются по ровному рельефу и наличию отчетливо слоистых толщ в верхней части разреза, облекающих неровную кровлю моренных отложений и представленных ледниково-озерными осадками.

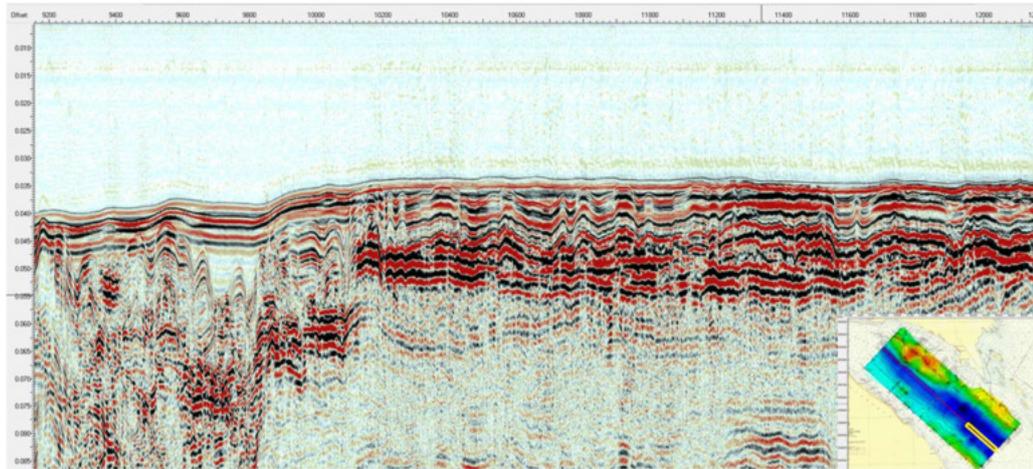


Рис.78 Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для субгоризонтальных выположенных ледниково-озерных равнин.

Таким образом, в результате геоморфологического анализа, проведенного по сейсмоакустическим и гидроакустическим данным в сочетании с геологическим проботбором были выделены основные типы подводных поверхностей, слагающих дно Петрозаводской губы Онежского озера (Рис.79).

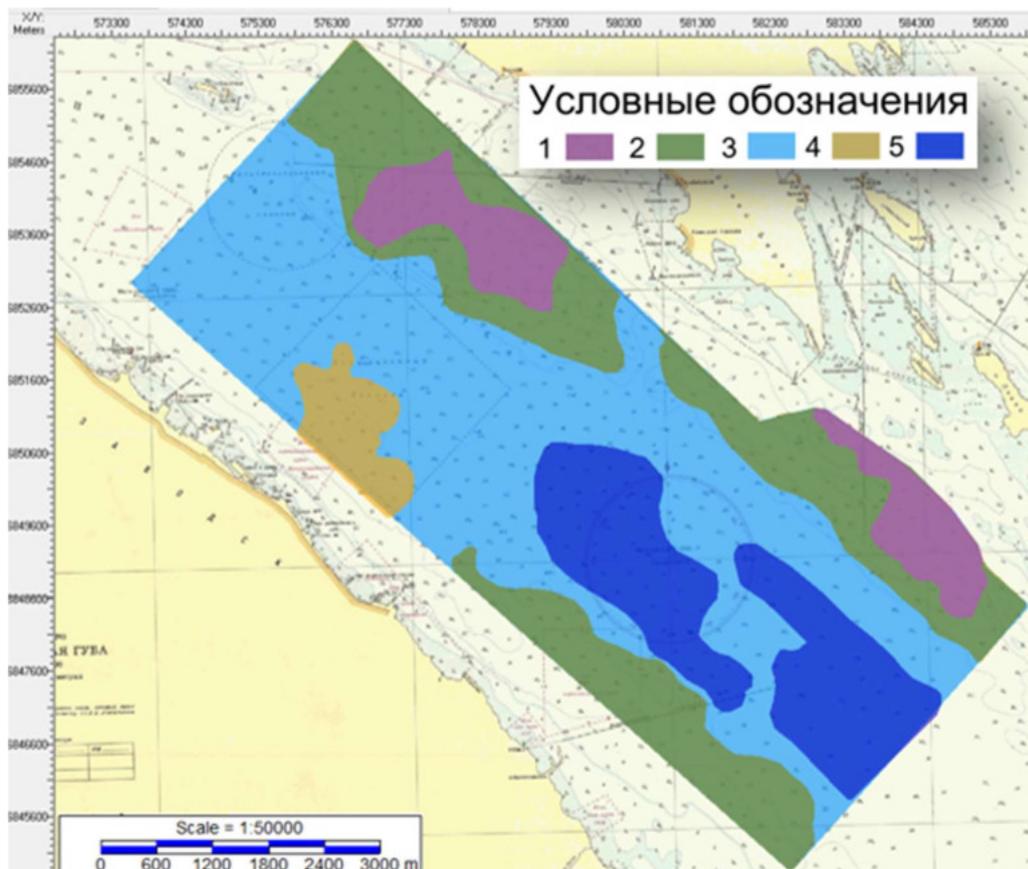


Рис.79. Геоморфологическая карта-схема Онежского озера. Цветами выделены различные типы подводных поверхностей: 1 - структурно-денудационная, 2, 4 - аккумулятивно-денудационная, 3,5 – озерно-нефелоидная аккумулятивная.

Было установлено, что рельеф дна Петрозаводской губы Онежского озера имеет гетерогенный характер и представлен следующими основными категориями: денудационно-структурной, аккумулятивно-денудационной ледниковой и флювиогляциальной, и озерно-нефелоидной аккумулятивной. Генезис их отражает последовательную смену ледниковых ландшафтов, развитием приледниковых бассейнов и смен их озерным бассейном, на дне которого наряду с накоплением озерных нефелоидов существуют обширные площадки, сложенные подводными выходами лимногляциальных глин и ледниковыми краевыми образованиями (краевые морены, озы).

На основании результатов геоморфологического анализа данных, полученных на полигоне Петрозаводской губы, а также полевых материалов, собранных в других участках Онежского озера в ходе более поздних экспедиций, была построена геоморфологическая карта-схема Онежского озера (Беляев и др., 2020, 2021).

5.4 Идентификация потенциально опасных геологических процессов и явлений

Опасные геологические процессы и явления представляют (ОГПЯ) собой инженерно-геологические и геологические процессы, в частности гидрометеорологические явления, которые негативно влияют на общее состояние строений и сооружений, а также на жизнедеятельность населения. Они являются одними из основных факторов, которые учитываются при проведении изысканий на шельфе. Методы исследований ОГПЯ разрабатываются кафедрой сейсмоакустики МГУ на различных акваториях («Разработка технологического...», 2017, «Разработка программно-аппаратных...», 2018, «Разработка и апробация...», 2021). Петрозаводская губа была выбрана в качестве одного из методических полигонов. Онежское озеро является стратегически важным пресноводным объектом с малыми глубинами, слабо изучено геологическими методами, характеризуется сейсмогеологическими условиями, пригодными для применения различных геолого-геофизических методов, а также удобно для проведения работ с точки зрения логистики. Результаты исследований Петрозаводской губы в дальнейшем могут быть использованы для расширения съемки на всю акваторию Онежского озера, а также могут применяться и на других объектах со схожими сейсмогеологическими условиями.

Согласно СП-504.1325800.2021, наиболее распространенными опасными геологическими и инженерно-геологическими процессами на шельфе являются литодинамические и склоновые

процессы (оползни, эрозия, переработка берегов морей), термоабразия, образование бугров пучения (на морском побережье), тектонические нарушения и землетрясения, грязевой вулканизм, газовые сипы (преимущественно метановые). При изучении дна и верхней части грунтового массива на глубину до 100 м ниже дна водоёма, геолого-геофизические методы играют важную роль, так как позволяют решать множество прикладных задач:

- определение следов техногенного воздействия и обнаружение подводных потенциально опасных объектов
- выявление газонасыщенных грунтов и газогидратов, каналов миграции газов и иных флюидов;
- определение в плане и разрезе геологических границ, обусловленных сменой литологического состава;
- определение кровли скальных (коренных) грунтов;
- выявление палеоврезов;
- выявление тектонических нарушений.

При этом основными методами приповерхностных и малоглубинных исследований являются: ССВР, СУВР, НЧ НСП, ВЧ НСП, ГЛБО, АПр и ЭР.

Выходы скальных грунтов

Выходы скальных грунтов на акватории Онежского озера и в его окрестностях связаны с близостью к поверхности коренных пород, слагающих Балтийский щит. Хотя в понижениях рельефа наблюдаются достаточно мощные осадочные толщи, достигающие на дне Петрозаводской губы 50 м, в зонах положительного рельефа нередко можно обнаружить коренные породы. Данное явление наиболее опасно для судоходства и рыболовства, особенно в зонах предельного мелководья. На полигоне исследований выходы скальных грунтов выделяются по данным ССВР (Рис.80).

Основными признаками выходов скальных грунтов на сейсмической записи являются:

- Высокие амплитуды отражений в кровле (более чем в 3-5 раз превышающие фоновые значения)
- Прямая полярность отражения от кровли
- Потеря корреляции в нижележащей части разреза
- Высокие значения УЭС

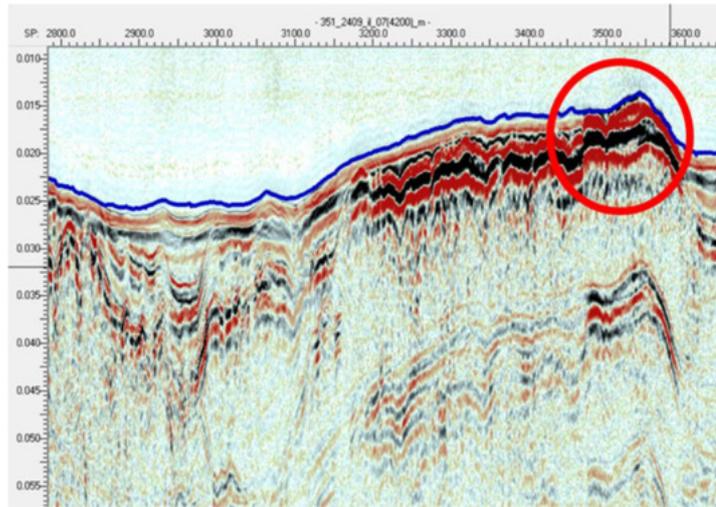


Рис.80 Пример данных ССВР с выделенным выходом скальных грунтов.

Границы, обусловленные сменой литологического состава

Смена литологического состава в плане и разрезе может быть опасной при проведении бурения или иных инженерных работ. На акватории Петрозаводской губы были обнаружены участки с выходом на поверхность дна флювиогляциальных осадков, образовавшихся в ходе отступления ледника. Они имеют отличный от вмещающих пород состав и являются более акустически жесткими, в связи с чем уверенно выделяются на мозаике ГЛБО в плане (Рис.81). На записях профилографа также обнаруживается изменение волновой картины, а именно отсутствие отражений акустического сигнала внутри подобных объектов, что может свидетельствовать о смене литологического состава осадка (Рис.82).

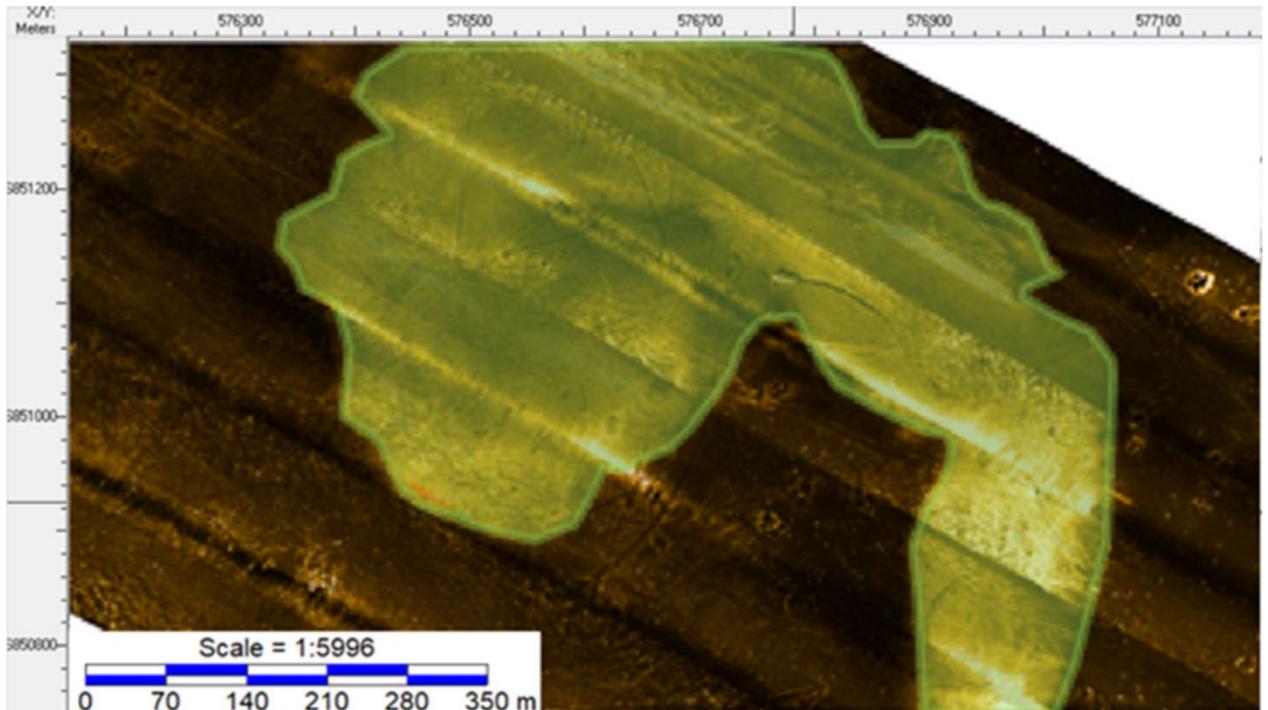


Рис.81 Пример данных ГЛБО с выделенной зоной неоднородности литологического состава, связанной с наличием флювиогляциальных осадков.

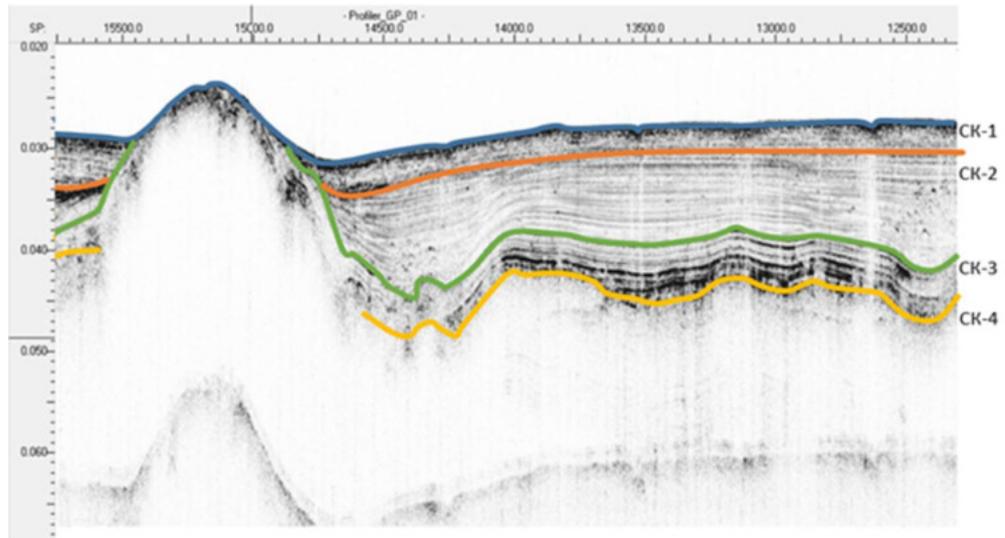


Рис.82 Пример неоднородности литологического состава, выделяемой по данным профилографа. В левой части рисунка - флювиогляциальные осадки, в правой - слоистая толща.

Следы техногенного воздействия

Петрозаводская губа находится в непосредственной близости города Петрозаводск. В связи с этим, в ней ведется активная деятельность как туристического, так рыболовного характера. В связи с этим, по данным гидролокации бокового обзора обнаруживаются различные следы техногенного воздействия. При выполнении инженерных работ на шельфе, в частности – при бурении, подобные объекты могут представлять собой угрозу и должны быть обнаружены до выполнения работ. На исследуемой акватории обнаруживаются различные объекты. Преимущественно это следы траления и якорных цепей. Однако иногда обнаруживаются и крупные объекты. В частности, на одном из профилей было найдено затонувшее плавательное средство, длиной порядка 15 м (Рис.83).

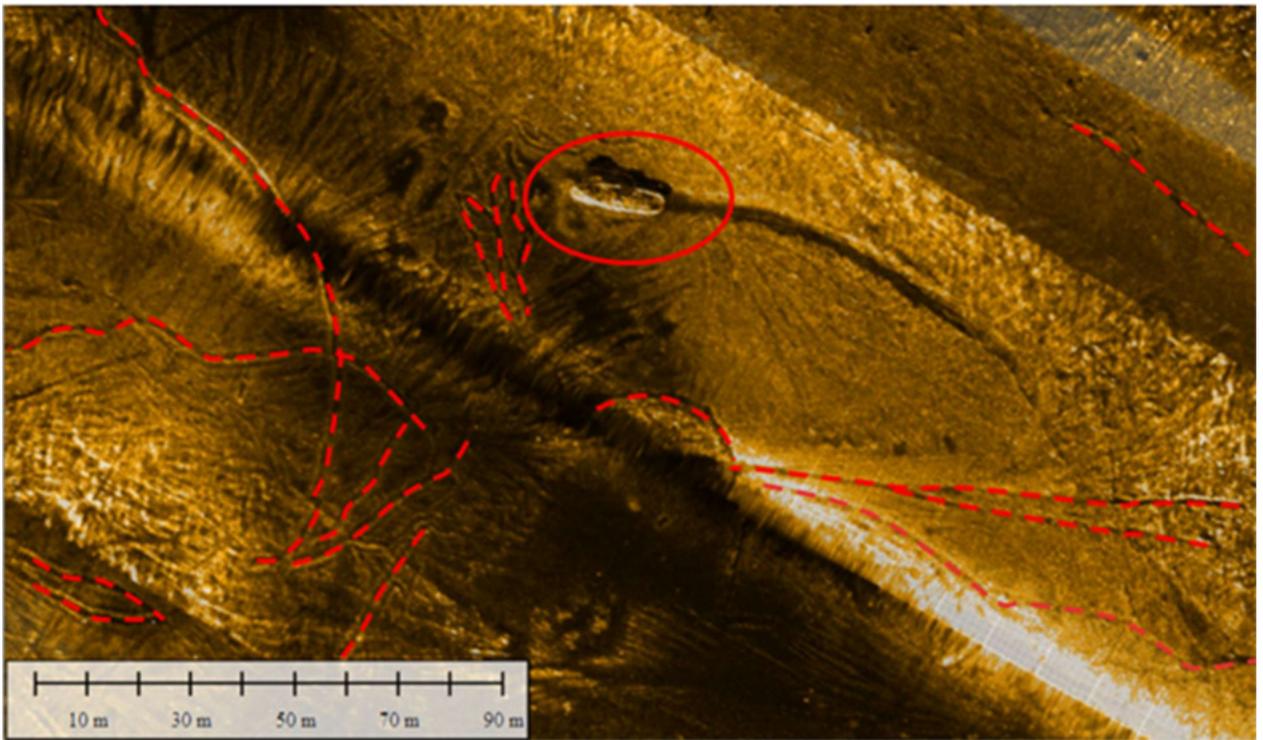


Рис.83 Пример следов техногенного воздействия в Петрозаводской губе Онежского озера.

Палеоврезы

Палеоврезы являются геологической опасностью, так как они могут представлять собой опасность при бурении на шельфе, поэтому в процессе интерпретации выделяются по сейсмоакустическим данным. На акватории Петрозаводской губы палеоврезы распространены слабо и сосредоточены в северо-западной части участка. Обнаруживаются в наиболее древних породах, перекрытых отложениями комплекса СК-4. Скорее всего, их возникновение связано с деятельностью ледника.

Основными признаками палеоврезов на сейсмоакустических данных (Рис.84) являются:

- Характерная форма в плане
- Эрозионный срез в бортовых частях и основании объекта
- Разрыв осей синфазности по латерали
- Возможно повышение амплитуды в нижней части объекта (потенциальное газонасыщение заполняющих осадков).

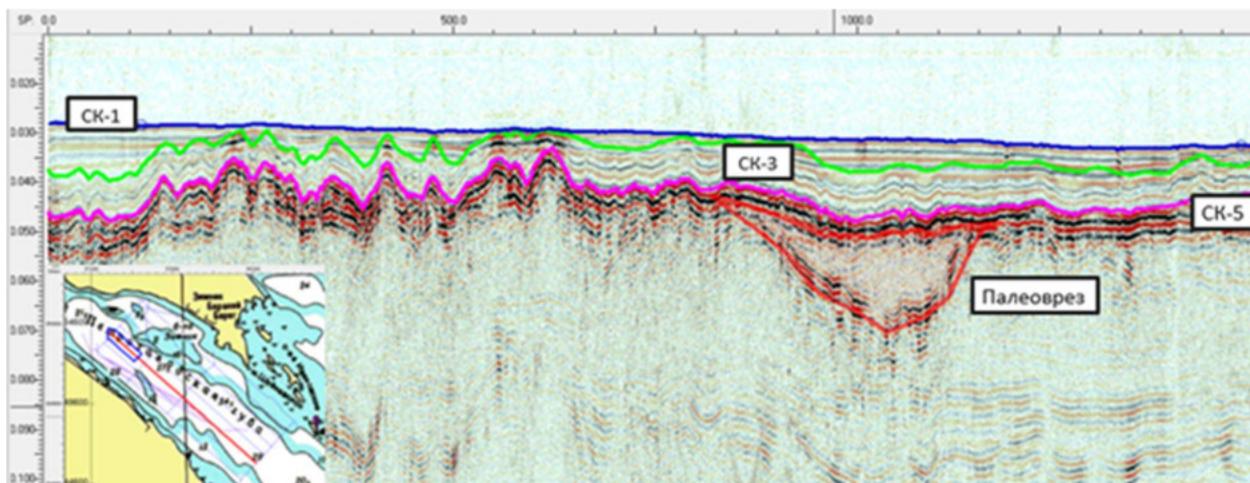


Рис.84 Пример выделенного по данным ССВР палеовреза в северо-западной части Петрозаводской губы.

Тектонические нарушения

Тектонические нарушения представляют опасность для работ в шельфовой зоне. Активные разломы могут спровоцировать оползень или иные неблагоприятные явления. Пассивные разломы могут служить каналами для флюидов. Тектонические нарушения широко распространены на акватории Петрозаводской губы. Выделяются по данным сейсмоакустических методов в коренных породах, слагающих наиболее древние комплексы (Рис.85). В осадочном чехле практически не выделяются. Наличие разрывных нарушений представляет опасность для проведения инженерных работ на акватории. Основными признаками тектонических нарушений являются:

- Разрыв осей синфазности отраженных волн;
- Смещение осей синфазности отражённых волн;
- Резкое изменение волновой картины по латерали;
- Резкое изменение угла наклона осей синфазности;
- Наличие дифрагированных волн;
- Наличие аномалий, связанных с газонасыщением пород.

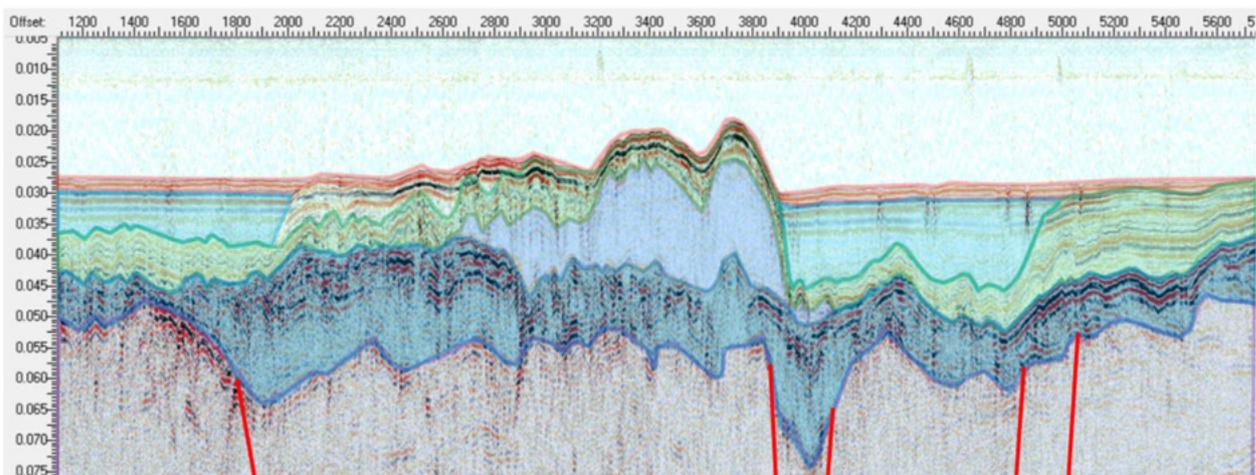


Рис.85 Пример интерпретации профиля ССВР в центральной части полигона Петрозаводской губы. Красным выделены линии разломов в наиболее древних комплексах.

По геофизическим данным были выявлены отдельные случаи тектонических разломов, которые повлияли на распределение мощностей осадков. Наличие разломов подтверждается характером волновой картины и резким изменением мощностей в верхней части разреза.

Газонасыщенные грунты и миграции газов

Одной из важных задач работ в Петрозаводской губе, был поиск газовых скоплений в донных осадках. Это имело как утилитарное значение, связанное с положением возможных выбросов газов непосредственной близости от города Петрозаводска – столицы Карельской республики РФ, так и методическое. Здесь отрабатывались методические вопросы, связанные с изучением газовыделений, которые затем предполагалось использовать при работах на арктических шельфах, на объектах нефтегазовой отрасли, где этим вопросам уделяется самое пристальное внимание. Наличие неучтенных зон сфокусированной разгрузки газа или областей площадного распространения газонасыщенных осадков может повлечь негативные последствия при проведении инженерных работ в шельфовой зоне.

В 2015 г., в ходе опытно-методических работ (ОМР) на акватории Онежского озера с целью выявления связи акустических свойств донных отложений с их газосодержанием, были впервые зарегистрированы следы газонасыщенности придонных осадков и обнаружены округлые воронки, предположительно - покмарки.

Планомерное выявление и оконтуривание скоплений газов в Петрозаводской губе проводилось с использованием геофизических и геохимических методов. Сразу следует оговориться, что крупные скопления газа в описываемом районе отсутствуют. В донных отложениях было выявлено много локальных проявлений этих газов – факелы в водной толще, аномалии типа «яркое пятно», каналы прорыва газов и пр. На сейсмограммах, в зонах повышенной мощности осадочных образований, часто отмечалось пропадание всех отражающих горизонтов, что также является хорошим поисковым признаком (Рис.86). Еще лучше скопления

газофлюидов отражаются на записях профилографа, где в случае появления газов целые участки сейсмограмм характеризуются практически полным исчезновением доступного для интерпретации изображения (Рис.87). Также можно увидеть и многочисленные яркие пятна, указывающие на скопления газов. Помимо этого, проявляются и характерные структуры выхода газофлюидов из грунта - покмарки. Впервые покмарки на акватории Петрозаводской губы были описаны в работе (Алешин и др., 2018).

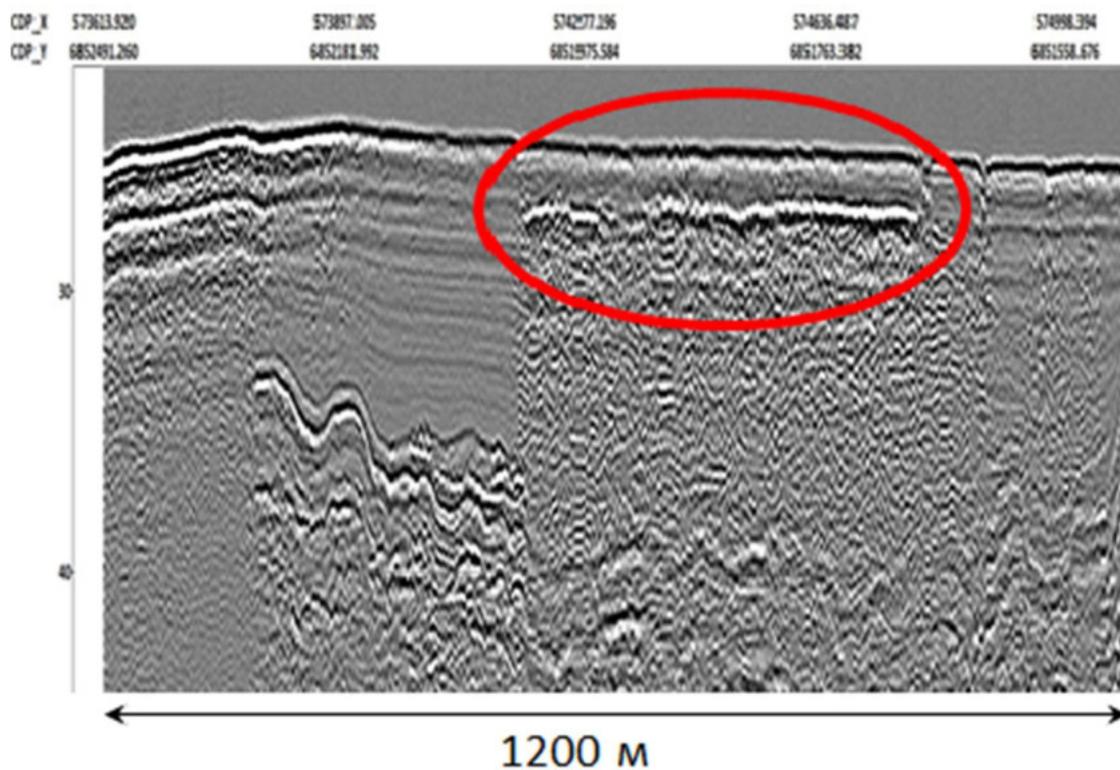


Рис.86 Пример области площадного распространения газонасыщенных осадков.

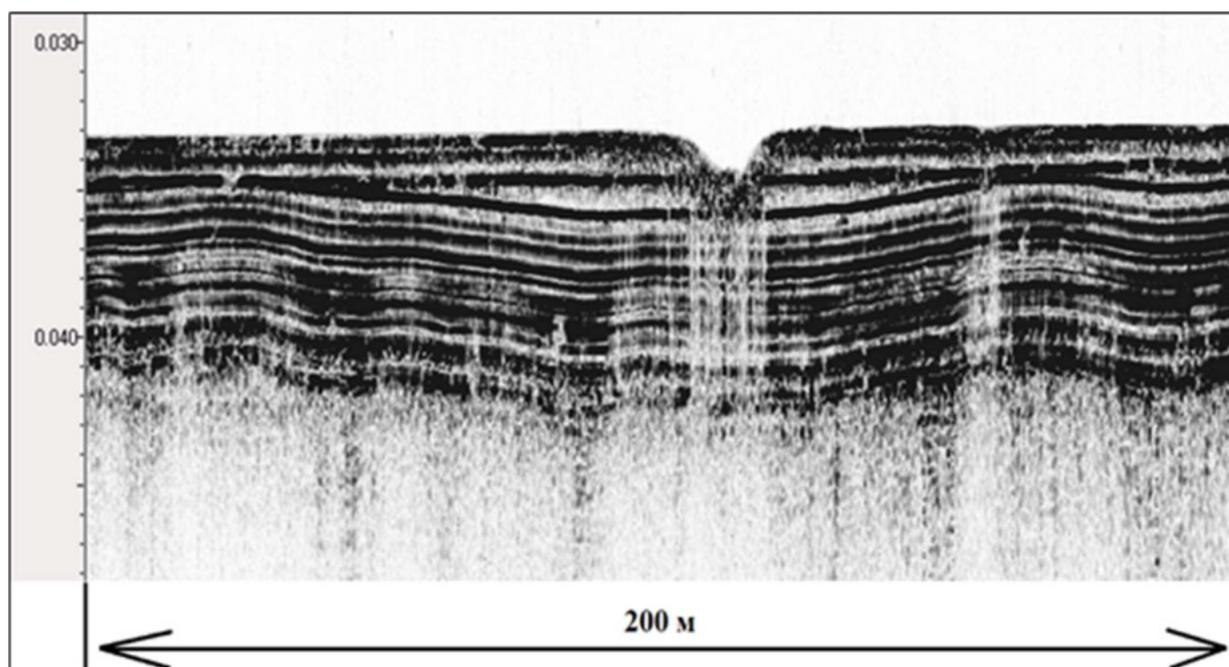


Рис.87 Пример данных профилографа, полученных по одному из профилей. Углубления в рельефе дна соответствуют покмаркам.

В ходе интерпретации данных ССВР в верхней части геологического разреза были выделены газовые аномалии П-образной формы (Рис.88). Волновая картина, наблюдаемая на данных профилирования, обладает четкими признаками газонасыщенности, такими как увеличение интенсивности отражения от дна, изменение фазы сигнала, поглощение сигнала на больших временах.

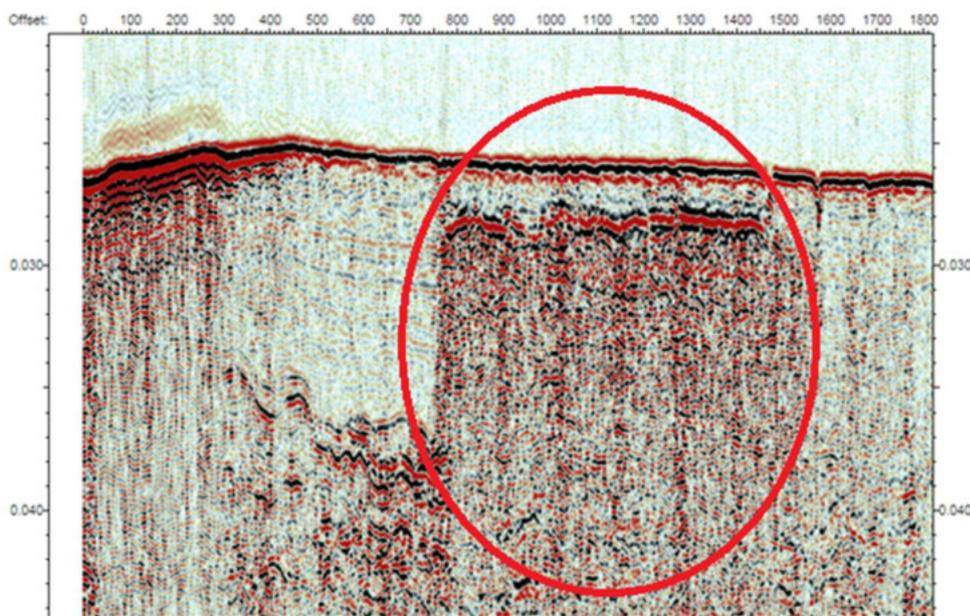


Рис.88 Пример данных ССВР, полученных по одному из профилей. Красным овалом выделен участок записи с волновой картиной, характерной для газонасыщенных осадков.

Особый интерес, в свете рассматриваемой проблемы, представляют собой покмарки – конусообразные понижения в рельефе, имеющие округлую в плане форму. Таких объектов в пределах полигона обнаружено несколько десятков. Они хорошо видны на данных, полученных любым из сейсмоакустических методов. Их глубина рассчитывалась, исходя из данных ССВР и профилографа и составила – 1-2 м. Радиус оценивался по данным ГЛБО и составил 5-10 м (Рис.89). Как правило, покмарки равномерно распределены по площади, в то же время местами прослеживаются их скопления. Сопоставление сонограмм с временными разрезами сейсмоакустического профилирования показывает, что покмарки связаны с газовыми потоками (струями), достигающими поверхности дна.

Кратерные структуры пок-марков закартированы в Петрозаводской губе с помощью гидролокатора бокового обзора. Отмечается их пространственная связь с глубокой депрессией в коренных породах, возможно, обусловленной тектоническим нарушением, о чем было сказано ранее. Они могут достигать в ширину до 7м и имеют различную форму. Среди них отмечаются

как растущие формы, так и уже закончившие свое развитие и в настоящее время частично размытые (Рис.89).

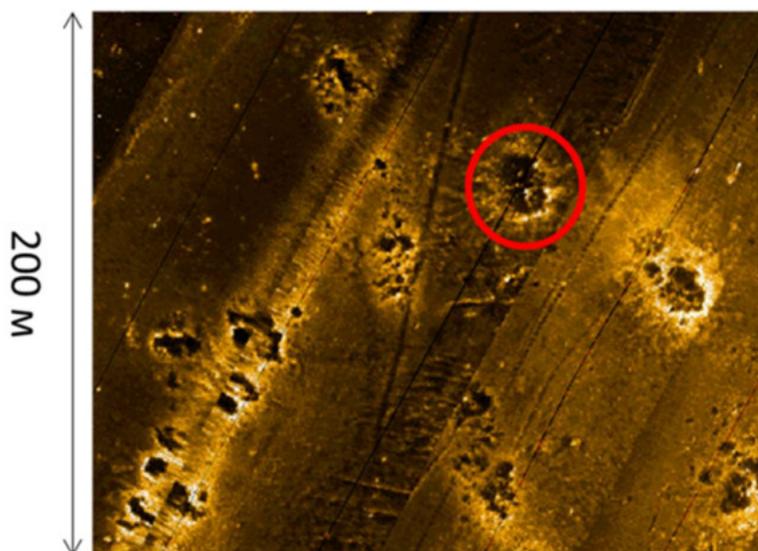


Рис.89 Фрагмент мозаики ГЛБО. Тёмные участки записи соответствуют малой интенсивности обратного рассеивания. Красным выделена небольшая пойма

Геофизические данные получили свое подтверждение и по данным геологического пробоотбора. В кернах донных осадков, отобранных в местах выявления скоплений газов по данным СУВР, через 10-15 минут после подъема его на палубу начиналось активное выделение газов, которое фиксировалось по появлению пор, захватывающих значительные площади керна (Рис.90). При этом запаха практически не ощущалось.



Рис.90 Образец керна, отобранного в области сфокусированной разгрузки газа. Наблюдается образование газовых пузырей.

Полученные в Москве томографические снимки показали наличие в таких колонках большого количества пор, многие из которых имели вытянутую форму, образовывали цепочки,

которые вытягивались вверх по керну (Рис.91). Проведенные геохимические исследования подтвердили преимущественно метановый состав выделяемых газов.

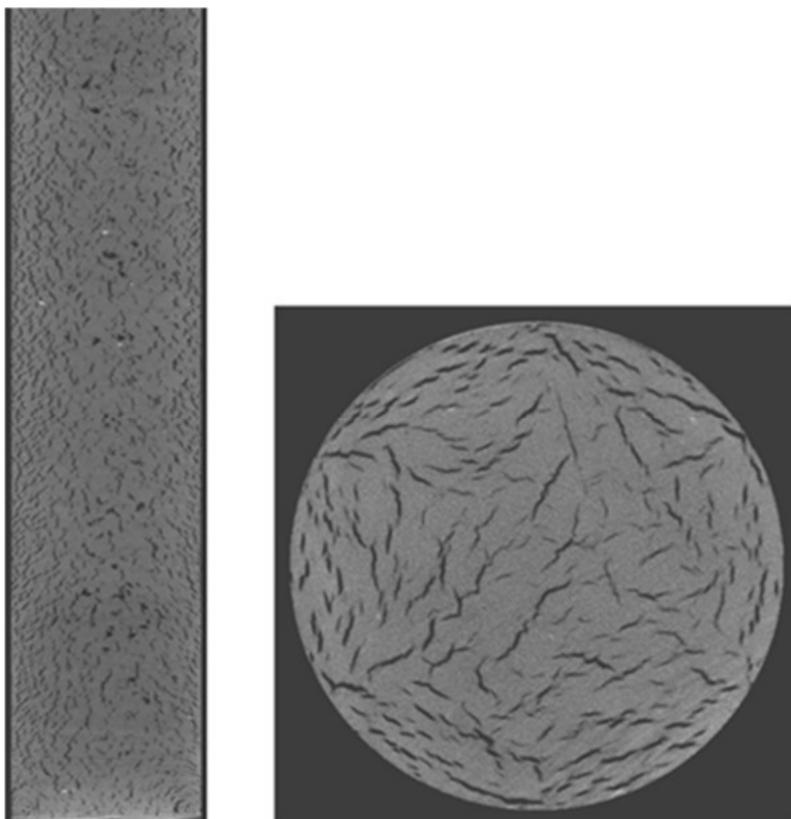


Рис.91 Результаты компьютерной томографии одного из газонасыщенных геологических образцов. Слева- вертикальная колонка длиной 1,5 м с видимыми порами, заполненными газом (более темные-результат разницы в коэффициентах поглощения минерального грунта и газа).

Имеющиеся данные позволяют считать, что в Петрозаводской губе мы имеем дело с двумя источниками газа. Первый из них связан с деструкцией органического вещества и его диагенетическом преобразовании. Второй источник - предположительно глубинные газы, проникающие в водную толщу по активированным в настоящее время нарушениям, о чем говорит и пространственное расположение покмарок.

Установлено, что увеличение концентрации газа в этих отложениях, способствует уменьшению объемного веса грунтов, и, соответственно, увеличению пористости. Некоторые текстурные особенности грунтов в нижней части вскрытого разреза свидетельствуют о их склонности к разжижению при сильных землетрясениях, имевших место в прошлом.

Природная плотность илов составляет 1,22-1,54г/см³, влажность-73-143%. Содержание органики достаточно однородно и невысокое -4.8 -5,5%. Глина текучая имеет влажность 63-167 %, природная плотность составляет 1,24-1,65г/см³. Сапропель высокоминеральный обнаружен в зоне газовыделений, обогащен гидротроилитом. Сапропель характеризуется повышенным содержанием органики (до 27%, при среднем значении 20%). Мощность слоя 1, 2м. Природная влажность грунта составляет – 90-159%, плотность – 1,31-1,36г/см³.

Плотность и пористость, кроме обычной зависимости от степени консолидации, также является функцией газовой составляющей. В юго-западной части района исследований находится участок миграции газа, который поднимается к донной поверхности по зоне трещиноватости. Здесь были зафиксированы очень низкие плотности грунтов – 1,22г/см³, в то время как плотность грунтов вне участка газонасыщенных грунтов составляет 1,5-1,6г/см³. Содержание метана, согласно литературным данным, в верхних горизонтах (до 10 см) донных осадков акватории Онежского озера крайне неравномерно и изменяется от <0,01 до 35,0 мкг/г влажного осадка (медиана – 0.29 мкг/г, n = 59) (Федоров и др., 2005). Источниками поступления метана в водную толщу, являются озерные осадки- илы и сапропели, вследствие интенсивно протекающих в них процессов метанообразования (Гарькуша, Федоров, 2015).

Слабые грунты, описанные выше, обладают оптимальными характеристиками для образования покмарок. Флюидоупором, ниже которого возникают скопления газа, вероятно, служат ленточные глины, мощность которых достигает 8 м. Результаты исследований изложены в публикации (Алёшин и др., 2018³).

Ранжирование опасных геологических процессов и явлений

По результатам анализа собранных геолого-геофизических материалов было проведено ранжирование геологических опасностей по степеням риска (Таблица 14). Наибольшую степень опасности имеют газонасыщенные грунты и каналы миграции газов. Они широко распространены на всей акватории Петрозаводской губы. При этом площадные скопления газа в грунтах наблюдаются в западной части полигона. Отдельные же зоны сфокусированной разгрузки флюидов выделяются практически повсеместно, где существуют значительные скопления осадков. В северной части полигона на значительных площадях встречаются выходы скальных грунтов, что осложняется мелководьем и сильной изменчивостью рельефа дна.

Остальные же выделенные потенциально опасные процессы, а именно: палеоврезы, тектонические нарушения, следы техногенного воздействия и литологические границы в плане обладают низкой степенью риска. Однако, они также должны учитываться при возможном планировании инженерных работ (СП-504.1325800.2021, 2021).

³ 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. Алёшин М.И., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Миринец А.К. Результаты комплексирования геолого-геофизических методов с целью определения структуры и свойств придонных осадков Петрозаводской губы Онежского озера // Геофизика. — 2021. — № Спецвыпуск. — С. 30–41. RSCI. Импакт-фактор в РИНЦ: 0.43. (1.27 п.л., авторский вклад 65%)
2. Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / Субетто Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д., Рыбалко А.Е., Зобков М.Б., Потахин М.С., Кулик Н.В., Ефременко Н.А., Лаврова Н.Б., Рязанцев П.А., Тарасов А.Ю., Филимонова Л.В., Шелехова Т.С., Шварев С.В., Алёшин М.И. и др.— КарНЦ РАН Петрозаводск, 2022. — 332 с.

Таблица 14 Ранжирование геологических опасностей по степеням риска

Тип опасности	Степень риска
Выходы скальных грунтов	Средняя
Геологические границы в плане, обусловленных сменой литологического состава	Низкая
Следы техногенного воздействия	Низкая
Палеоврезы	Низкая
Тектонические нарушения	Низкая
Газонасыщенные грунты	Высокая
Каналы миграции газов	Высокая

По результатам комплексной геолого-геофизической съемки удалось построить карту геологических опасностей для Петрозаводской губы Онежского озера (Рис.92). Красным цветом на ней выделяются опасности высокой степени риска, оранжевым – средней степени и зеленым – низкой степени.

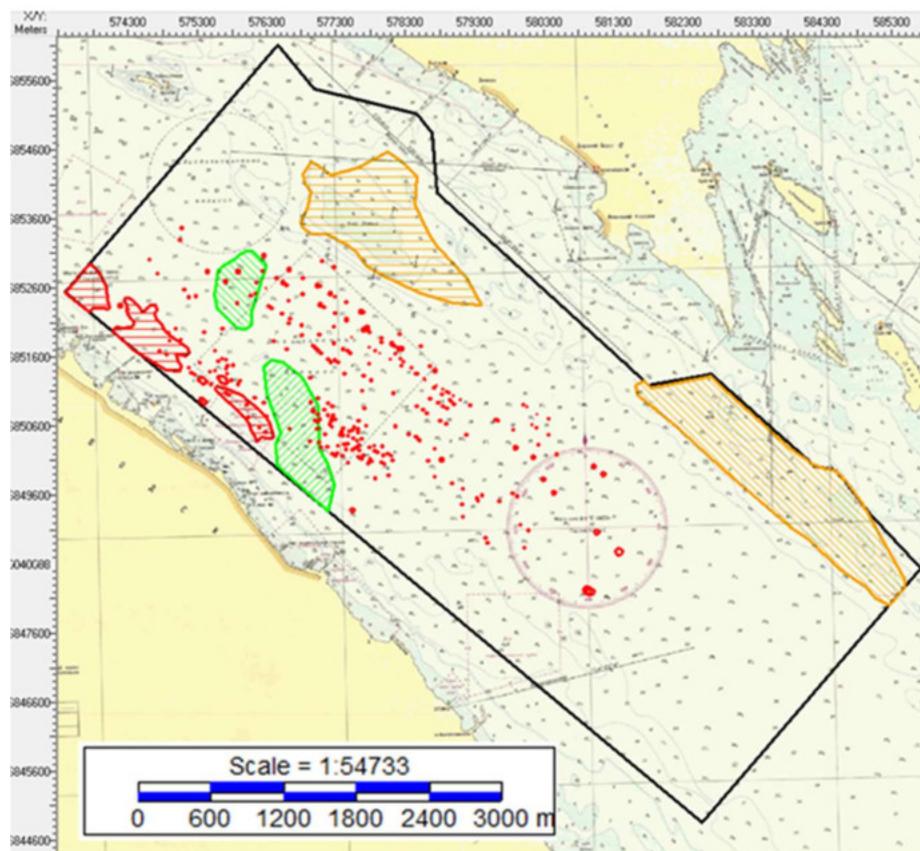


Рис.92 Карта потенциально опасных геологических процессов и явлений. Зеленым показаны зоны низкой степени опасности, оранжевым - средней степени опасности, красным - высокой степени опасности.

В результате исследований впервые для Петрозаводской губы удалось решить задачу картирования различных ОГПЯ. По данным, полученным геолого-геофизическими методами удалось установить конкретные характеристики ОГПЯ, распространенных на изучаемой акватории. Полный список ОГПЯ был составлен в соответствии со сводом правил (СП 504,1325800.2021, 2021). Полученные признаки ОГПЯ были в дальнейшем использованы в полевых исследованиях ((«Разработка технологического...», 2017, «Разработка программно-аппаратных...», 2018, «Разработка и апробация...», 2021), а также в различных методических разработках, нашедших отражение в ряде публикаций (Миринец и др., 2022; Токарев и др., 2021а, 2021б).

Заключение

Итоги выполненного диссертационного исследования

В ходе подготовки к исследованию Петрозаводской губы Онежского озера были изучены сейсмогеологические условия, характерные для района работ. Был проведён анализ литературных источников, посвященных как геологической изученности объекта исследований, так и современным методикам геолого-геофизических съемок на акваториях. Это позволило сформировать аппаратно-программный комплекс для сбора информации о строении четвертичных осадков, их физических характеристиках, а также для проведения геоморфологического анализа и идентификации опасных геологических процессов и явлений.

Сформированный аппаратно-программный комплекс включил в себя аппаратуру для проведения съемки различными гидро- и сейсмоакустическими, электромагнитными, лабораторными и геологическими методами. Особенностью данного комплекса является набор методик измерения, основанный на специфических сейсмогеологических условиях Онежского озера: пресная вода, малые глубины, относительно малые мощности четвертичных отложений, высокая изменчивость рельефа и геологического строения осадков.

Была проведена площадная геофизическая съемка на площадке размером 12 км на 4.2 км, результаты которой заверялись и дополнялись геологическим пробоотбором. Исследования проводились в несколько полевых этапов на различных научно-исследовательских судах, а также катерах. Для обеспечения набортного контроля качества сейсмоакустических данных была разработана и испытана система сбора геофизических данных SborEx, ориентированная на выполнение непрерывных инженерных геофизических съемок на акватории.

По завершении полевого этапа полученные полевые материалы обрабатывались в камеральных условиях с целью подготовки материалов для последующей интерпретации. В результате обработки геофизических данных стандартным набором методов удалось получить разрезы нулевых удалений, геоэлектрические разрезы и мозаику ГЛБО для Петрозаводской губы Онежского озера. К особенностям графа обработки стоит отнести процедуры, связанные с восстановлением геометрии наблюдений при работе с заглубленной приемно-излучающей системой.

Получена оценка различных физических свойств четвертичных отложений Петрозаводской губы Онежского озера. В лабораторных условиях были проведены ультразвуковые, электромагнитные и другие исследования, позволившие получить оценку акустических и электромагнитных свойств образцов. По результатам сейсмо- и

электромагнитной инверсии были рассчитаны такие физические свойства осадков, как скорости распространения звука, коэффициенты отражения и удельные электрические сопротивления.

В результате полевых и камеральных исследований было установлено, что программно-аппаратный комплекс в результате последующей обработки позволил получить детальную количественную оценку физических свойств донных осадков, слагающих верхнюю часть геологического разреза на пресноводных акваториях. В дальнейшем, опыт работы на акватории Петрозаводской губы был расширен на другие участки Онежского озера, что нашло отражение в монографии [Субетто и др. 2022].

Впервые для Онежского озера по результатам площадной геолого-геофизической съемки выполнена геологическая интерпретация геофизических данных на всю мощность надледникового разреза и кровлю моренных отложений. Было выделено пять сейсмокомплексов: СК1 – средне- и верхне-голоценовые озерные илы и гитии; СК2 – нижне-голоценовые озерные илы гомогенизированные и глины; СК3 – озерно-ледниковые ленточные глины осташковского горизонта; СК4 – ледниковые отложения осташковского горизонта; СК5 – кристаллический фундамент. На основании данных, полученных в ходе исследований, составлена схема четвертичных отложений Петрозаводской губы Онежского озера.

Основываясь на полученных сейсмоакустических, гидроакустических и гидролокационных данных удалось провести геоморфологический анализ Петрозаводской губы Онежского озера. Были выделены три основных типа рельефа, характерных для площади исследования: структурно-денудационный, аккумулятивно-денудационный и аккумулятивный. Была составлена карта-схема геоморфологического строения Петрозаводской губы, использовавшаяся в дальнейшем для построения карт Онежского озера.

Также в ходе исследований открытой части и северной части озера, выходящих за рамки данной работы, было подтверждено (Алёшин и др, 2019), что схема четвертичных отложений и геоморфологическая схема Петрозаводской губы может быть обобщена на большую часть акватории Онежского озера (Беляев и др., 2020, 2021). Также схема была внедрена во ВСЕГЕИ для уточнения гос. Геол. Карт масштаба 1:1000000.

Помимо геологического строения и физических свойств осадков, сформированный комплекс методов позволил идентифицировать опасные геологические процессы и явления: следы техногенного воздействия, газонасыщенные грунты, каналы миграции газов, палеоврезы и тектонические нарушения, обнаружить в плане и разрезе геологические границы, обусловленные сменой литологического состава, а также выходы на поверхность скальных грунтов. Для этого были проанализированы признаки ОГПЯ на сейсмо и гидроакустических данных, на основании которых происходила идентификация и картирование.

Выводы

В результате проведенного исследования впервые на акватории Петрозаводской губы Онежского озера был сформирован комплекс геолого-геофизических методов, который позволяет проводить площадные комплексные геолого-геофизические исследования в озерных условиях. По данным, полученным этим комплексом, удалось определить физические свойства осадков, составить схему геологического строения четвертичных отложений Петрозаводской губы, геоморфологическую карту изучаемого полигона, а также локализовать потенциально опасные геологические процессы и явления, определенные в СП-504.1325800.2021. По результатам съемки в Петрозаводской губе также была построена карта потенциально опасных геологических процессов и явлений.

Исследования проводились в рамках методических работ на полигоне Петрозаводской губы с целью последующего применения полученных наработок на других участках со схожими сейсмогеологическими условиями, как на акватории Онежского озера, так и в других регионах. Результаты геологической интерпретации укладываются в существующую концепцию формирования и развития Онежского озера, представленную в работах других авторов. В частности, на схемах дегляциации озера, комплексом методов были подтверждены ранее предположительные контуры краевых образований, а также флювиогляциальные дельты.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Проведение комплексных площадных геолого-геофизических исследований с многоканальной аппаратурой на данном полигоне позволило, во-первых, расширить понимание истории развития озера и дополнить существующие геологические модели, а также позволило отработать методику работы на мелководных пресноводных акваториях, что может быть в дальнейшем использовано для изучения Онежского озера, в частности для подготовки дальнейших ландшафтных экологических и научных исследований. В дальнейшей перспективе комплексные площадные геолого-геофизические исследования целесообразно провести также в открытой части и менее исследованных заливах. Это позволит расширить и уточнить схему четвертичных отложений Онежского озера и более подробно изучить вопросы истории формирования как непосредственно водоема, так и региона в целом.

Сокращения

АПр	Акустическое профилирование
ГЛБО	Гидролокация бокового обзора
МОВ	Метод отраженных волн
НСП	Непрерывное сейсмоакустическое профилирование
ОГПЯ	Опасные геологические процессы и явления
ОГТ	Общая глубинная точка
ОМР	Опытно-методические работы
ОСТ	Общая срединная точка
ПВ	Пункт возбуждения
СВР	Сейморазведка высокого разрешения
СК	Сейсмокомплекс
СП	Свод правил
ССВР	Сейморазведка сверхвысокого разрешения
СУВР	Сейморазведка ультравысокого разрешения
УЭС	Удельное электрическое сопротивление

Список иллюстраций

Рис.1. Внешний вид одного из вариантов конструкции электроискрового излучателя SplitMultiSeis. При работе на пресноводных акваториях излучающие секции помещаются в контейнер, наполненный солевым раствором.....	14
Рис.2 Блок управления и антенна параметрического профилографа SES-2000 compact..	15
Рис.3 Пример компактного комплекта гидролокации бокового обзора, буксируемого за судном на кабель-тросе.	16
Рис.4 Результат применения мультимастотных гидроакустических данных для изучения донных ландшафтов (из Elias Fakiris, 2019).	18
Рис.5 Положение полигона исследований (красный контур) на физической карте Онежского озера.....	21
Рис.6 Состав донных отложений Онежского озера по пробоотбору (Saarnisto, Saarinen, 2001).....	23
Рис.7 Схема максимальной стадии развития Онежского приледникового озера и положения линии гляциоизостатического равновесия (оси перекося котловины) по данным И.Н. Демидова (Демидов, 2006).	24
Рис.8 Сейсмоакустические профили, снятые через Онежское озеро в 1997-2000 гг (Макарьев, 2001).....	25
Рис. 9. Схема сейсмического канала, использовавшегося для проведения полевых испытаний.	29
Рис. 10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ "SbotEx".	34
Рис.11 Карта фактического геолого-геофизического материала полевых исследований 2016-2021 гг на акватории Петрозаводской губы (синим цветом показаны профили ССВР со спаркером, красным – ССВР с бумером, АПр и ГЛБО, желтым – электротомография, зеленые звезды – станции геологического пробоотбора и инженерного бурения).	41
Рис.12 Схема наблюдений с положением приемно-излучающей расстановки при работе с заглубленной системой.....	46
Рис.13 Пример сейсмической записи вдоль профиля, полученной методом ССВР с заглубленной приемно-излучающей установкой.....	46
Рис.14 Изображение многоволновой картины на сейсмограммах ОПВ по одному из участков профиля.	47
Рис.15 Пример данных ГЛБО, полученных на акватории Петрозаводской губы.	48

Рис.16. Профиль, полученный приповерхностной съемкой АПр. Глубинность – 20 м. Вертикальная разрешающая способность – 0.1 м.....	49
Рис.17 Процедура спуско-подъемных работ с геологическим пробоотборником.....	50
Рис.18 Схема расположения станций пробоотбора в Петрозаводской губе Онежского озера (Красным помечены точки отбора проб с гравитационной трубкой, зеленым - точки бурения со льда, синими линиями показаны профили съемки ССВР 2019 года).	52
Рис.19 Фотография рабочего процесса при бурении со льда в Петрозаводской губе Онежского озера.....	52
Рис.20 Расположение ультразвуковых датчиков на трубке с керном.	53
Рис.21 Фото процесса проведения измерений акустических свойств на трубке.	54
Рис.22 Схема варианта измерительной установки для измерений в осадках.	55
Рис.23. Волновые картины, полученные для трех сред: 1. Гидрофобный песок; 2. Гидрофильный песок; 3. Вода.....	56
Рис.24 Результаты ультразвуковых измерений времени и скорости звука для трех сред. 56	
Рис.25 Установка для измерения скорости звука в осадках в пробоотборных трубках. ..	56
Рис.26 Волновые картины, зарегистрированные при заполнении трубки воздухом (1), водой (2) и водонасыщенным песком (3).....	56
Рис.27 Пример сейсмограммы общего удаления (ОУ), построенной по 3 каналу. Цветом выделены окна расчета амплитудного спектра.....	60
Рис.28 Пример сейсмограммы общего удаления (ОУ) после полосовой фильтрации. Видно значительное улучшение качества волновой картины по сравнению с рис. 29.	61
Рис.29 Фрагмент записи ССВР 2016 г, сейсмограммы общего удаления по каждому из каналов приемной косы.	62
Рис.30 Сейсмограммы общего удаления с графиком среднеквадратичных амплитуд (зеленым цветом), рассчитанных для донного импульса в диапазоне 5 мс.	62
Рис.31 Характерный результат расчета значений отношения сигнал/помеха ,	63
Рис.32. Вид окна модуля, использовавшегося для присвоения геометрии. Размер бина выбирался исходя из того, чтобы получить среднюю кратность, равную 16.....	63
Рис.33 Сейсмограммы ОСТ с наложенной теоретической гиперболой (параметры указаны в верхней части рисунка зеленым цветом).	64
Рис.34 Пример сейсмограмм общей срединной точки (ОСТ), полученных по одному из профилей после предобработки.....	64
Рис.35. Пример внешнего вида окна вертикального спектра скоростей и суперсейсмограммы ОСТ.....	65
Рис.36 Пример сейсмограмм ОСТ до ввода кинематических поправок.....	66

Рис.37 Пример сейсмограмм ОСТ после ввода кинематических поправок.	66
Рис.38 Пример данных по одному из продольных профилей, полученных после суммирования по ОСТ. Видно значительное ослабление некогерентных помех и увеличение соотношения сигнал/шум по сравнению с исходными данными на рис. 28.....	67
Рис.39 Фрагмент сейсмоакустического профиля до применения процедуры деконволюции.....	68
Рис.40. Фрагмент сейсмоакустического профиля после применения процедуры деконволюции.....	68
Рис.41 Пример сейсмоакустических данных до миграции Столта	69
Рис.42 Пример сейсмоакустических данных после миграции Столта.....	69
Рис.43 Негиперболичность годографов и пересечение волн-спутников на сейсмограммах ОПВ.	71
Рис.44 Сейсмограммы ОПВ до (слева) и после (справа) введения статических поправок	72
Рис.45. Геоэлектрические разрезы по 9 профилям в Петрозаводской губе по данным электротомографии.	74
Рис.46. , Сопоставление геоэлектрических разрезов, полученных по данным донной электротомографии с выделенными сейсмоакустическими комплексами (по материалам работы А. К. Миринец, А. А. Бобачева и А. Е. Рыбалко., 2022).....	74
Рис.47 Пример исходных данных ГЛБО по двум бортам до ввода поправок за наклонную дальность и коррекции амплитуд.	75
Рис.48 Слева изображена сонарограмма до ввода поправки за наклонную дальность, справа - после.....	76
Рис.49 Пример гидроакустического изображения коррекции амплитуд сигнала (Слева - до ввода коррекции амплитуд, справа – после).	76
Рис.50 Фрагмент планшета акустической мозаики (светлые тона соответствуют повышенным амплитудам рассеянного сигнала, темные – пониженным). В правой части рисунка наблюдается затонувшее плавательное средство. В центральной части видны следы якорей и изометричные понижения в рельефе дна.....	77
Рис.51 Пример волновой картины на исходных данных акустического профилографа (АПр). Масштаб: временной, мс.....	78
Рис.52 Волновая картина после устранения высокоамплитудных помех на данных АПр.	78
Рис.53 Данные профилографа после ввода коррекции амплитуд за сферическое расхождение сигнала.	79

Рис.54 Пример данных профилографа до (сверху) и после (снизу) миграции Столта в FK области.	80
Рис.55 Данные акустического профилирования после применения преобразования Гильберта.	81
Рис.56 Сейсмограмма ОГТ, полученная по профилю, расположенному в центральной акватории Петрозаводской губы. Цветными линиями показаны границы сейсмокомплексов СК-1, СК-2, СК-3, СК-4, СК-5. Возраст комплексов приведен в тексте.	83
Рис.57 Пример схем, полученных в ходе интерпретации разреза четвертичных отложений: а) фрагмент профиля ССВР с выделенным СК-4 (синим); б) литологическая колонка, отобранная из СК-4 в) структурная карта кровли СК-4.	85
Рис. 58. Результат площадных структурных построений исследуемой акватории Петрозаводской губы, выполненных по каждому из выделенных сейсмоакустических комплексов четвертичных отложений.	86
Рис.59 Пример разреза, полученного акустическим профилографом. Цветом выделены сейсмокомплексы 1-4.	87
Рис.60 Карта фактического материала геолого-геофизической съемки 2019 г. в северной части Онежского озера (красными звездами отмечены точки геологического пробоотбора, а красной линией - профили ССВР).	88
Рис.61 Фрагмент сейсмоакустического разреза с выделенным газонасыщенным участком (зеленый круг), полученного в северной части Онежского озера (пунктирными линиями выделены границы сейсмокомплексов). Для четырех точек рассчитаны таблицы физических свойств по каждому комплексу: коэффициенты отражения, плотности и импедансы.	89
Рис.62 Пример исходной сейсмотрассы и спектр импульса Р-волны.	90
Рис.63 Профиль S-09 (красная линия), данные ССВР с заглубленной системой до фильтрации.	92
Рис.64 Профиль s-09, данные после предварительной обработки.	92
Рис.65 Профиль s-09, после применения импульсной деконволюции.	93
Рис.66 Пример скоростного анализа для точки ОСТ (CDP) 11238400.	94
Рис.67 Участок профиля S-09 после суммирования по ОСТ.	94
Рис.68 Схема пути, проделанного волной в горизонтально-слоистой среде. На первом рисунке (а) кратное и донное отражения, на втором (б) - в двух слоях с разной скоростью распространения звука.	95
Рис.69 Таблицы физическими свойствами с рассчитанными по каждому из выделенных сейсмокомплексов (желтые линии).	97

Рис.70. Сопоставление геоэлектрических разрезов, полученных по данным донной электротомографии с выделенными сейсмоакустическими комплексами (по материалам работы А. К. Миринец, А. А. Бобачева и А. Е. Рыбалко., 2022).....	98
Рис.71 Цифровая модель рельефа дна Петрозаводской губы, построенная по данным сейсмоакустических и гидроакустических измерений.....	100
Рис.72. Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для структурно-денудационной группы.....	101
Рис.73 Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для ледниковой равнины, входящей в аккумулятивно-денудационной группу рельефа.	102
Рис.74. Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для флювиогляциальной холмисто-увалистой структуры, входящей в аккумулятивно-денудационной группу рельефа.	103
Рис.75 Пример сонограммы ГЛБО, характерной для флювиогляциальной аккумулятивно-денудационной группы рельефа. В центральной части выделяется флювиогляциальная холмисто-рядовая структура, окруженная ледниковой равниной. Светлым тонам соответствуют более высокие амплитуды.....	103
Рис.76. Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для озерно-нефелоидных равнин.....	104
Рис.77 Пример сонограммы ГЛБО, характерной для озерно-нефелоидных равнин. Отчетливо выделяются как единичные, так и скопления изометричных понижений в рельефе – покмарки.	104
Рис.78 Пример волновой картины по данным СУВР, характерной для субгоризонтальных выположенных ледниково-озерных равнин.	105
Рис.79. Геоморфологическая карта-схема Онежского озера. Цветами выделены различные типы подводных поверхностей: 1 - структурно-денудационная, 2, 4 - аккумулятивно-денудационная, 3,5 – озерно-нефелоидная аккумулятивная.	106
Рис.80 Пример данных ССВР с выделенным выходом скальных грунтов.	108
Рис.81 Пример данных ГЛБО с выделенной зоной неоднородности литологического состава, связанной с наличием флювиогляциальных осадков.	108
Рис.82 Пример неоднородности литологического состава, выделяемой по данным профилографа. В левой части рисунка - флювиогляциальные осадки, в правой - слоистая толща.	109
Рис.83 Пример следов техногенного воздействия в Петрозаводской губе Онежского озера.	110

- Рис.84 Пример выделенного по данным ССВР палеовреза в северо-западной части Петрозаводской губы. 111
- Рис.85 Пример интерпретации профиля ССВР в центральной части полигона Петрозаводской губы. Красным выделены линии разломов в наиболее древних комплексах.. 112
- Рис.86 Пример области площадного распространения газонасыщенных осадков..... 113
- Рис.87 Пример данных профилографа, полученных по одному из профилей. Углубления в рельефе дна соответствуют покмаркам. 114
- Рис.88 Пример данных ССВР, полученных по одному из профилей. Красным овалом выделен участок записи с волновой картиной, характерной для газонасыщенных осадков. 114
- Рис.89 Фрагмент мозаики ГЛБО. Тёмные участки записи соответствуют малой интенсивности обратного рассеивания. Красным выделена небольшая покмарка..... 115
- Рис.90 Образец керна, отобранного в области сфокусированной разгрузки газа. Наблюдается образование газовых пузырей. 115
- Рис.91 Результаты компьютерной томографии одного из газонасыщенных геологических образцов. Слева- вертикальная колонка длиной 1,5 м с видимыми порами, заполненными газом (более темные-результат разницы в коэффициентах поглощения минерального грунта и газа). 116
- Рис.92 Карта потенциально опасных геологических процессов и явлений. Зеленым показаны зоны низкой степени опасности, оранжевым - средней степени опасности, красным - высокой степени опасности. 119

Список таблиц

Таблица 1 Сейсмоакустические излучатели, использовавшиеся на полевом этапе работ	30
Таблица 2. Накопители энергии, использовавшиеся при выполнении работ на Онежском озере.....	31
Таблица 3 Сейсмокосы, использовавшиеся для регистрации данных на полевом этапе работ	32
Таблица 4 Сейсмостанции, использовавшиеся для оцифровки данных.....	33
Таблица 5 Акустический профилограф с приемно-излучающей антенной	35
Таблица 6 Гидролокаторы бокового обзора, использовавшиеся на полевом этапе работ	35
Таблица 7 Комплекс оборудования для отбора и исследования керна и лабораторных исследований керна.....	36
Таблица 8 Комплекс электроразведочной аппаратуры	37
Таблица 9 Навигационное обеспечение полевых работ.....	38
Таблица 10 Сейсмоакустические и электроразведочные приборы для лабораторных исследований	39
Таблица 11 Наименования и фотографии флота, использовавшегося для проведения полевых испытаний в Петрозаводской губе.....	42
Таблица 12 Результаты измерений скорости продольных волн на образцах.....	91
Таблица 13 Количественная оценка физических свойств осадков Петрозаводской губы Онежского озера.....	98
Таблица 14 Ранжирование геологических опасностей по степеням риска	118

Список литературы

1. **Алёшин М.И.**, Видищева О.Н., Валиева Э.И., Миринец А.К., Егошина Е.Д., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н. Четвертичные отложения открытой части Онежского озера и Заонежского залива // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22. – № 3. – С. 35-52. RSCI. Импакт-фактор в РИНЦ: 0,767. (1.85 п.л., авторский вклад 59%).
2. **Алёшин М.И.**, Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А. Изучение придонных осадков в Петрозаводской губе Онежского озера с помощью комплексирования геолого-геофизических методов изучения донных отложений // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2019. – № 4. – С. 98-104. RSCI. Импакт-фактор в РИНЦ: 0,411. (0.69 п.л., авторский вклад 55%).
3. **Алёшин М.И.**, Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Миринец А.К. Результаты комплексирования геолого-геофизических методов с целью определения структуры и свойств придонных осадков Петрозаводской губы Онежского озера // Геофизика. — 2021. — № Спецвыпуск. – С. 30–41. RSCI. Импакт-фактор в РИНЦ: 0.43. (1.27 п.л., авторский вклад 65%).
4. **Алёшин М.И.**, Миронюк С.Г., Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Потемка А.К. Первые итоги изучения покмарок Онежского озера // Процессы в геосредах. – 2018. – Т. 1. – № 14. – С. 732-740. Импакт-фактор в РИНЦ: 0,18 (0.92 п.л., авторский вклад 50%).
5. Амантов А. В. Геология дочетвертичных образований и тектоника Ладожского озера // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 58.– С. 22-32.
6. Беляев П.Ю. Рельеф дна и строение поздневалдайских-голоценовых отложений котловин Ладожского и Онежского озёр. Диссертация на соискание степени кандидата геол.-мин.наук, ФГБУ «ВСЕГЕИ». – 2021. – 115 с.
7. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Зобков М.Б. Новые данные о рельефе котловины Онежского озера // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 7. – 2020. – С. 274-277. DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10744

8. Беляев П.Ю., Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Зобков М.Б., Фёдоров Г.Б. Четвертичные отложения и рельеф Онежского озера // Географический вестник. – Пермь: ПГУ, 2021. – №1(56). – С. 6–16. DOI: 10.17072/2079- 7877-2021-6-16
9. Бискэ Г.С., Лак Г.Ц., Лукашов А.Д. и др. Строение и история котловины Онежского озера. – Петрозаводск: 1971. – 74 с.
10. Блинова Е.И., Вилкова О.Ю., Милютин Д.М., Пронина О.А., Штрик В.А. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны: Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Вып. 3. – М.: ВНИРО, 2005. – 139 с.
11. Бобачев А.А., Сергеев К.С., Горин А.Д. Акваторные электроразведочные исследования с донными установками // Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – 2018. – С. 609-613.
12. Борисов А.С. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер. Диссертация на соискание степени доктора геол.-мин.наук, Казанский гос. ун-т. – 2004. – 267 с.
13. Буданов Л.М., Глазунов В.В., Сергеев А. Ю., Корпачев Ю.П. Картирование погребенных долин в пределах акватории озера Сестрорецкий Разлив по данным комплексных гидрогеофизических исследований // Материалы 13-й конференции и выставки «Engineering Geophysics 2017», Кисловодск. – С. 2017. – С. 190–198. DOI: 10.3997/2214-4609.201700398
14. Ванисов А.М., Клопов А.Л. Особенности газогеохимических съемок в Западной Сибири (в комплексе дистанционных и геофизических методов локального нефтепрогнозирования) // Вестник Недропользователя ХМАО. – 2005. – № 16. – С. 35-42.
15. Ворошилов Н.А., Вешев С.А., Алексеев С.Г., Васильева В.И. Геохимический способ поисков углеводородов. Патент РФ №1087796 от 3 апреля 1996 г.

16. Галимов Э.М. Источники и механизмы образования углеводородных газов в осадочных породах // Геохимия. – 1989. – № 2. – С. 163-180.
17. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А. Особенности распределения содержания метана в прибрежных участках Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. – № 3. – С. 288–297.
18. Гурвич В.А., Потахин М.С., Субетто Д.А. Стратиграфия донных отложений реликтовых водоемов Онежского озера (на примере оз. Полевское) // Астрах. вестн. кол. образования. – 2017. – № 3 (41). – С. 4–13.
19. Демидов И. Н. Деградация последнего оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. – С. 134–142.
20. Демидов И. Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. – Петрозаводск, 2006. – С. 171–182.
21. Иванова Н.М., Беляев И.В., Дружинина Е.А., Нечхаев С.А., Стеблянко А.В., Куликов Т.Д. Геофизические исследования на мелководье Обской и Тазовской губ // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 10. – С. 30-34.
22. История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Серия: История озёр СССР / под ред. Квасова Д.Д., Кошечкина Б.И., Аманатова А.В. и др. – Л.: Наука, 1990. – 279 с.
23. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. – М.: Недра, 1983. – 204 с.
24. Карцев А. А., Табасаранский З. А., Суббота М. И., Могилевский Г. А. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений. – М.: Гостоптехиздат, 1954. – 430 с.

25. Крылов П.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Об истории развития озера Балхаш (Казахстан) по сейсмоакустическим данным // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2014. – Т. 156, кн. 1. – С. 128–136.
26. Крылов П.С., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Проявление газа в донных отложениях на сейсмоакустических разрезах озера Большое Яровое // Ученые записки Казанского университета. Том 157. Кн. 4. Естественные науки. – 2015. – С. 73-81.
27. Лаверов Н. П., Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Фундаментальные аспекты рационального освоения ресурсов нефти и газа Арктики и шельфа России: стратегия, перспективы и проблемы // Арктика: экология и экономика. – 2016. – № 2 (22). – С. 4-13.
28. Лисицын А.П., Немировская И.А., Шевченко В.П., Воронцова В.Г. Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. 1048 с.
29. Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Кисилев А.В. и др. Геофизические исследования на акватории Онежского озера // Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерализация). Отв. ред. Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. – Петрозаводск: КНЦ РАН, 2011. – С. 339-356.
30. Макарьев А.А. Объяснительная записка к листу Р-36-XXX по производству геологической съемки 1 : 500 000 дна Онежского озера. СПб., 2001.
31. Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Погорельский А.И., Серов Е.К. Перспективы полезных ископаемых прибрежной зоны Онежского озера // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 9. – С. 61-64.
32. Максимов А.В., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Коссовая О.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35),36 – Петрозаводск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 400 с. + 3 вкл.
33. Миринец А.К., Бобачев А.А., Миронюк С.Г. Выделение мерзлых и газонасыщенных грунтов в Обской губе Карского моря по данным донной электротомографии в комплексе с

- акустическим профилированием и бурением // Геофизика. – 2022. – № 6 – С. 33–41.
10.34926/geo.2022.11.15.005
34. Науменко М.А., Гузиватый В.В., Сапелко Т.В. Цифровые морфометрические модели малых озер // Учен. зап. РГГМУ. – 2014. – № 34. – С. 26-32.
35. Нигмедзянова А.Р. Сейсмоакустические исследования при изучении палеомагнетизма донных отложений современных озер / Борисов А.С., Нигмедзянова А.Р. // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 1. – С. 48-49.
36. Никонов А.А., Шварев С.В. Сейсмолинеаменты и разрушительные землетрясения в Российской части Балтийского щита: новые решения для последних 13 тысяч лет // Материалы Международной конференции "Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности". – Нерюнгри: Изд-во Технического института СВФУ, 2015. – С.243-25
37. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидролокации. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
38. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2011. – 431 с.
39. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. – 151 с.
40. Павлова В.Ю., Соловьев В. А., Кокорева А. С. Опыт работы с прибором георадар "ОКО-250" для уточнения грунтовых условий на озерновской косе Култучного озера (город Петропавловск-Камчатский) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 35. – № 2. – С. 110-119. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-110-119
41. Потахин М.С., Субетто Д.А., Зобков М.Б., Тарасов А.Ю., Гурбич В.А. Реконструкция развития Онежского озера в позднеледниковье ГИС-методами // Палеолимнология Северной Евразии. Опыт, методология, современное состояние. Proceedings of the International Conference. North-Eastern Federal University, Russian Academy of Sciences. – 2016. – С. 99-102.

42. Рязанцев П. А., Родионов А. И. Опыт комплексирования георадиолокации и динамических зондирований при инженерно-геологических изысканиях на акватории Онежского озера // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2015. – № 2. – С. 101-104.
43. Разработка и апробация модернизированной технологии выявления опасных геологических процессов с оценкой параметров природной среды на Тестовом полигоне Дальневосточного шельфа: отчет о НИР: № 5039-307-16-1 / МГУ; рук. М. Ю. Токарев; исполн. Пирогова А.С., Росляков А.Г., Замотина З.С., Пронин И.С., Понимаскин А.И., Потемка А.К., Алёшин М.И., и др. – М., 2021. – 1194 с.
44. Разработка программно-аппаратных комплексов для поиска, разведки, геофизического и геохимического мониторинга разработки месторождений углеводородов, в т.ч. в труднодоступных регионах и сложных природно-климатических условиях: отчет о НИР: МГУ; рук. М. Ю. Токарев; исполн. Несмеянов М.Д., Владов М.Л., Шалаева Н.В., Стручков В.А., Старовойтов А.В., Ошкин А.Н., Алёшин М.И., и др. – М., 2018. – 724 с.
45. Разработка технологического регламента по выявлению и оценке геологических рисков при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса на Арктическом и Дальневосточном шельфе: отчет о НИР (заключ.): № 5039-307-16-1 / МГУ; рук. М. Ю. Токарев; исполн. Пирогова А.С., Терёхина Я.Е., Алёшин М.И., Ампилов Ю.П., Ахманов Г.Г. и др. – М., 2022.
46. Рыбалко А.Е., Репкина Т.Ю., Токарев М.Ю., Терехина Я.Е., Соловьева М.А., Хлебникова О.А., Гончарова А.М., Горбачев С.В. Четвертичный покров Печорского моря: особенности его строения в свете новых данных бурения и сейсмоакустического профилирования // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – СПб: ВСЕГЕИ, 2021. – С. 209–214.
47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618288 Российская Федерация. Sub-Bottom Offshore Research and Exploration / А. А. Сергеев, В. И. Бачурин, М. И. Алешин; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Сплит».

– Заявка № 2016616077; дата поступления 09.06.2016; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.07.2016. – 1 с.

48. Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера. – М.; Л.: Наука, 1966. – 124 с.
49. Семенович Н.И. Донные отложения Онежского озера. – Л.: Наука, 1973. – 104 с.
50. Соколов В.А. Геохимия природных газов. – М.: Недра, 1971. – С. 293–320.
51. Соколов В.А. Прямые геохимические методы поисков нефти. – М.; Л.: Госоптехиздат, 1947. – 305 с.
52. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
53. Сомервилл С. Г., Пауль М. А. Словарь по геотехнике. Пер. с англ. Л.: Недра, 1986. – 240 с.
54. СП 504,1325800.2021. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19.07.2021 г. № 481/пр: введен 20.01.2022 г. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 176 с.
55. Стадник Е.В. Новые прямые методы геохимических поисков нефти и газа. – М.: ВНИИОЭНГ, 1984. – 52 с.
56. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Марченко А.Л., Субетто Д.А., Рыбалко А.Е., Алёшин М. Возможности георадиолокации при изучении четвертичных отложений в озерах Карелии // Труды IV Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU-2015». – 2015. – С. 73-74.
57. Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д., Рыбалко А.Е., Зобков М.Б., Потахин М.С., Кулик Н.В., Ефременко Н.А., Лаврова Н.Б., Рязанцев П.А., Тарасов А.Ю., Филимонова Л.В., Шелехова Т.С., Шварев С.В., **Алешин М.И.** и др.— КарНЦ РАН Петрозаводск, 2022. — 332 с.
58. Субетто Д.А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции. – СПб.: Изд-во РГПУ имени А.И. Герцена, 2009. – 339 с.

59. Субетто Д.А., Потахин М.С., Зобков М.Б., Тарасов А.Ю., Шелехова Т.С., Гурбич В.А. Развитие Онежского озера в позднеледниковье по результатам ГИС-моделирования // Геоморфология. – 2019. – № 3. – С. 83-90. DOI: 10.31857/S0435-42812019383-90
60. Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Галаев В.Е. Геостатистический анализ гидроакустических наблюдений в проливе Великая Салма // Геофизика. Спецвыпуск. – 2021. – С. 35–39.
61. Токарев М.Ю., Локтев А.С., Росляков А.Г., Пирогова А.С., Рыбин Н.А., Хоштария В.Н., Данилевская Н.С. Инновационные технологии выявления и оценки геологических рисков при бурении и возведении объектов нефтегазового комплекса на Арктическом шельфе // Наука и техника в газовой промышленности. – 2021а. – №2. – С. 20–33.
62. Токарев М.Ю., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Бирюков Е.А., Колюбакин А.А., Горбачев С.В. Перспективные сейсмические технологии для инженерно-геологических изысканий на мелководном шельфе // Геофизика. Спецвыпуск. – 2021б. – С. 3–11.
63. Трофимов В. Т., Аверкина Т. И. Теоретические основы региональной инженерной геологии. – М.: ГЕОС, 2007, 464 с.
64. Урупов А.К., Левин А.Н. Определение и интерпретация скоростей в методе отраженных волн. – М.: Недра, 1985. – 288 с.
65. Усенков С. М. Седиментология и геоэкология больших озер Северной Европы и Северной Америки. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2012. – 192 с.
66. Успенский В.А. Баланс углерода в биосфере в связи с вопросом о распределении углерода в земной коре. – Л.: Госоптехиздат, 1956. – 101 с.
67. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. и др. Метан в водных экосистемах. – Ростов на/Д; М.: Ростиздат, 2005. – 329 с.
68. Ферсман А.Е. Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. Со статьями С. А. Боровика, Г. В. Горшкова, С. Д. Попова и А. Ф. Соседко. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. – 446 с.

69. Филимонова Л.В., Лаврова Н.Б. Изучение палеогеографии Онежского озера и его бассейна с использованием комплекса методов // Труды Карельского научного центра РАН. – № 10. – 2017. – С. 1–15. DOI: 10.17076/lim703.
70. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Дальневосточного региона: распределение, генезис, связь с геологическими структурами, газогидратами и сейсмотектоникой. Диссертация на соискание степени доктора геол.-мин.наук, ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДО РАН. – 2015. – 459 с.
71. Шаров Н. В., Журавлев А. В. Строение земной коры Белого моря и прилегающих территорий // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 3 (35). – С. 62–72
72. Электроискровый источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / под ред. А. В. Калинина. – М.: МГУ, 1989. – 193 с.
73. Beliaev P., Rybalko A., Subetto D., Tokarev M., **Aleshin M.** Structure-geomorphological features of the largest lakes of Russian North-West // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – № 4. – P. 515-516. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-515 (0.23 п.л., авторский вклад 10%)
74. Binley A., Kemna A. DC resistivity and induced polarization method // *Hydrogeophysics* (Eds. Y. Rubin, S. S. Hubbard). – Springer, 2005. – P. 129–156. DOI: 10.1007/1-4020-3102-5_5
75. Bückner M., Lozano G. S., Ortega G. B., Caballero M. M. et al. Geoelectrical and Electromagnetic Methods Applied to Paleolimnological Studies: Two Examples from Desiccated Lakes in the Basin of Mexico // *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. – 2017. – 2(69). – P. 279-298. DOI: 10.18268/bsgm2017v69n2a1
76. Cukur D., Krastel S., Tomonaga Y. et al. Seismic evidence of shallow gas from Lake Van, eastern Turkey // *Marine and Petroleum Geology*. Vol. 48. – 2013. – P. 341-353.
77. Edgerton, H. E., & Hayward, G. G. (1964). The “boomer” sonar source for seismic profiling. *Journal of Geophysical Research*, 69(14)
78. Fakiris E., Blondel P., Papatheodorou G., Christodoulou D., Dimas X., Georgiou N., Kordella S., Dimitriadis C., Rzhanov Yu., Geraga M., Ferentinos G. Multi-frequency, multi-sonar mapping of

shallow habitats—Efficacy and management implications in the national marine park of Zakynthos, Greece // *Remote Sensing*. – 2019. – 11. – P. 461. DOI: 10.3390/rs11040461

79. Greenwood S. L., O'Regan M., Swärd H., Floden T., Ananyev R., Chernykh D., Jakobsson M. Multiple re-advances of a Lake Vättern outlet glacier during Fennoscandian Ice Sheet retreat, south-central Sweden // *Boreas*. – 2015. – Vol. 44. – № 4. – P. 619-637. DOI: 10.1111/bor.12132

80. Haflidason H., Zweidorff J.L., Baumer M., Gyllencreutz R., Svendsen J. I., Gladyshev V. & Logvina E. The Lastglacial and Holocene seismostratigraphy and sediment distribution of Lake Bolshoye Shchuchye, Polar Ural Mountains, Arctic Russia // *Boreas*. – 2019. – Vol. 48. – P. 452–469. DOI: 10.1111/bor.12387

81. Heinrich C., Anders S. & Schwarzer K. Late Pleistocene and early Holocene drainage events in the eastern Fehmarn Belt and Mecklenburg Bight, SW Baltic Sea // *Boreas*. – 2018. – Vol. 47. – P. 754–767. DOI: 10.1111/bor.12298. ISSN 0300-9483

82. Isaenkov R., Ponimaskin A.I., Tokarev M.J. Processing Workflow for the Dynamic Interpretation of Very-high-resolution P-wave Seismic Data // *Near Surface Geoscience 2016 - Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. – 2016. – Vol. 2016. – p. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201602154

83. Judd A., Hovland M. *Seabed Fluid Flow: Impact of geology, biology and the marine environment*. – Cambridge University Press, Cambridge, 2007. – 475 p.

84. Kaufman, A.A., Alekseev, D., Oristaglio, M, *Principles of electromagnetic methods in surface geophysics*. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – Vol. 45. – 770 p.

85. Maksimov A. O. Acoustics of marine hydrocarbon seeps // *Proc. 5-th World Congress on Ultrasonics, Universite 6. Paris, 2003*. – P. 229-232.

86. Lunkka, J. P., Sarala, P., and Gibbard, P. L. The Rautuvaara section, western Finnish Lapland, revisited – new age constraints indicate a complex Scandinavian Ice Sheet history in northern Fennoscandia during the Weichselian Stage // *Boreas*. – 2015. – Vol. 44. – P. 68-80. DOI: 10.1111/bor.12088

87. Rybalko A., Tokarev M., Subetto D. et al. Methods of conducting complex studies to restore the paleolimnological conditions and underwater landscapes of large lakes by the example of Petrozavodsk Bay of Lake Onega // *Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status and young scientist school in microscopy skills in Paleolimnology: proceedings of the 3rd International Conference*. – Kasan: Kasan Univesity, 2018. – P. 96-98.
88. Rybalko A.E., Zhuravlyov V.A., Semenova L.R., Tokarev M.Yu. Development history and Quaternary deposits of the White Sea basin // *Sedimentation Processes in the White Sea / A.P. Lisitzin and L.L. Demina (Eds.)*. – Switzerland AG: Springer Nature, 2018. – 287 p.
89. Saarnisto M., Gronlund T., Ekman I. Lateglacial of Lake Onega – contribution to the history of the eastern Baltic basin // *Quaternary International*. – 1995. – Vol. 27. – P. 111–120.
90. Saarnisto M., Saarinen T. Deglaciation chronology of the Scandinavian Ice Sheet from the lake Onega basin to the Salpausselkya End Moraine // *Global and Planetary Changes* 31. – 2001. – P. 333–405. DOI: 10.1016/S0921-8181(01)00131-X
91. Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V., Belkina N., Tokarev M., Potakhin M., **Aleshin M.**, Belyaev P., Dubois N., Kuznetsov V., Korost D., Loktev A., Shalaeva N., Kiskina A., Kostromina N., Kublitskiy Y., Orlov A. Structure of Late Pleistocene and Holocene Sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia) // *Minerals*. – 2020. – V. 10. – № 11. – P. 964-984. DOI: 10.3390/min10110964. Scopus, SJR: 0.522. (2,31 п.л., авторский вклад 10%).
92. Watzin Mary C., Manley Patricia L., Manley T. O. et al. Lakebed Pockmarks in Burlington Bay, Lake Champlain II. Habitat Characteristics and Biological Patterns // *Lake Champlain: Partnerships and Research in the New Millennium*, 2004. – P. 331-348. DOI: 10.1007/978-1-4757-4080-6_18
93. Wessels M., Bussmann I., Schloemer S. et al. Distribution, morphology, and formation of pockmarks in Lake Constance, Germany // *Limnol. Oceanogr.* – 2010. – 55(6). – P. 2623–2633. DOI: 10.4319/lo.2010.55.6.2623
94. Wiseman C., O’Leary M., Hacker J., Stankiewicz F., McCarthy J.K., Beckett E., Leach J., Baggaley P.A., Collins C.M., Ulm S., McDonald J., Benjamin J. A multi-scalar approach to marine

survey and underwater archaeological site prospection in Murujuga, Western Australia // *Quaternary International*. – 2021. – Vol. 584. – P. 152-170. DOI:10.1016/j.quaint.2020.09.005