

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр»
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

ИВОР

Горохов Иван Викторович

**ВЛИЯНИЕ СНЕЖНО-ЛЕДОВОГО ПОКРОВА
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРЕСНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЯКУТИИ**

1.6.7 - Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
И.И. Христофоров

Якутск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД	15
1.1. Фундаментальные принципы и теоретическое описание работы георадиолокации	15
1.2 Электрофизические свойства сред водного объекта, методика исследований и аппаратура	19
1.3 Область решаемых задач на водных объектах методом георадиолокации	26
Выводы	34
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГА И ЛЬДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	37
2.1 Аналитический подход к определению влияния толщины снежного и ледяного покрова на результаты георадиолокационного зондирования.....	37
2.2 Серия мониторинговых георадиолокационных наблюдений на водном объекте с учетом изменяющейся мощности сезонного ледяного и снежного покрова.	44
2.3 Численное моделирование георадиолокационного зондирования при различных электрофизическими свойствах сред	56
Выводы	68
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТЕННОЙ УСТАНОВКИ, СНИЖАЮЩЕЙ УРОВЕНЬ ПОМЕХ ПРИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СО ЛЬДА	70
3.1 Обоснование возможности сокращения уровня шумов, вызванных структурными нарушениями льда	70
3.2 Обоснование оптимальных высот для антенн с частотами 150 МГц, 250 МГц	73

3.3 Методические подходы георадиолокационного исследования водных объектов с поверхности льда	83
Выводы	86
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РЕК И ОЗЕР ЯКУТИИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД С УЧЕТОМ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	87
4.1 Методический подход для снижения уровня помех при георадиолокации линейных сооружений с поверхности чистого льда.....	87
4.2. Батиметрия и анализ строения донных отложений озер Бестяхской террасы с поверхности льда.....	93
4.3 Поиск перспективных участков скоплений ископаемой мамонтовой кости в среднем течении реки Колымы с поверхности льда	106
Выводы	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Изучение водных объектов суши в контексте научных и геотехнических исследований обладает фундаментальным и прикладным значением. Актуальность данного направления определяется необходимостью детального анализа строения водных объектов и их донных отложений, сведения о которых являются основой для решения задач в промышленной, строительной и научной деятельности. Результативность исследований в значительной мере зависит от корректности выбора методики и точностью используемых инструментальных средств. Для изучения строения и физических свойств водных объектов широкое распространение получили геофизические методы, преимуществом которых выступает возможность оперативного и неразрушающего комплексного анализа исследуемого объекта.

Рассматриваемый в данной работе метод георадиолокации является эффективным инструментом, применяемым при решении широкого спектра инженерных, гидрологических, гидрогеологических, гидроэкологических и поисково-разведочных задач на акваториях. Как и все методы геофизики, георадиолокация обладает возможностью решения задач в сложных условиях, таких как, заболоченная местность, низкие температуры, ограниченное пространство и т.д. Однако, в контексте применения георадиолокации на водных объектах с поверхности сезонно-мерзлого покрова, необходимо выделить ряд факторов, ограничивающих эффективность метода: ограничение глубины зондирования, снижение разрешающей способности, а также высокая зависимость качества регистрируемых данных от источников помех, находящихся в ледяной толще (слоистость льда, трещины, примеси, лунки и т.д.).

В системе водных объектов наиболее сложное строение в зимний период имеют объекты, расположенные в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород. Данный факт обусловлен тем, что большинство рек и озёр криолитозоны начинают промораживаться в середине октября и остаются в ледяном покрове более 6 месяцев в году, при этом мощность, строение

и структура льда в реках и озерах меняются в течение всего холодного периода. В связи с этим, в регионах с ранним ледоставом и длительным зимним периодом, особенно актуален вопрос совершенствования приемов зимней георадиолокации, учитывающих оптимальные условия проведения исследований, их проектирования и выполнения без существенного снижения эффективности метода в сравнении с результатами, полученными с водной поверхности.

Таким образом, в научно-исследовательской работе изучается влияние мощности снежного и ледяного покровов на распространение электромагнитной волны в таких средах как, воздух, снег, лед, вода, донные отложения, а также выделяются методические особенности и подходы, учет которых способствует повышению эффективности метода георадиолокации с поверхности льда при решении научных и геотехнических задач на водных объектах Якутии.

Степень разработанности темы исследования. Опыт применения георадиолокации для изучения донных отложений и рельефа водных объектов рассматривался в ряде научных исследований, представленных в трудах российских и зарубежных исследователей. При этом основное внимание в изученной литературе уделяется опытам, выполненным преимущественно с поверхности воды. Значительное количество публикаций посвящено применению георадара для изучения строения водного объекта и его донных отложений, что отражено в работах Владова М. Л., Старовойтова А. В., Омельяненко А. В., Христофорова И. И., Рязанцева П. А., Родионова А. А. и др. Изучение донных отложений озер Карелии, в частности сапропелевых отложений представлено в трудах Старовойтова А. В., Рязанцева П. А., Родионова А. А. Исследования дражных полигонов с поверхности воды описаны в публикациях Куляндина Г. А, и Федоровой Л. Л. Инженерно-геофизические изыскания на акваториях методом георадиолокации отражены в работах Омельяненко А. В., Христофорова И. И., Аузина А. А., Зацепина С. А., Глазунова В. В.

Наряду с исследованиями, выполненными с поверхности воды, в литературе известны труды, посвященные применению георадаров для анализа снежного и ледяного покрова на водных объектах в зимний период. Ранние исследования по

применению импульсной радиолокации для определения мощности льда были представлены в работах отечественных и зарубежных исследователей таких, как Финкельштейн М. И. и Evans S. В дальнейшем данный подход получил развитие в трудах Хмелевского В. К., Калинина А. М., Рудакова В. Н., Богородского В. В. и других исследователей, что позволило существенно расширить область применения метода. Более современные исследования льдов, ледников, ледяных глетчеров описаны в работах Омельяненко А. В., Федорова М. П., Федоровой Л. Л., Оленченко В. В., Борисика А. Л., Новикова А. Л., Грига С. А., Попова С. В., Григорьевой С. Д. и др. Также, известны специализированные контрольно-индикационные приборы, которые широко применяются для оперативного определения толщины льда. Так, например прибор «Пикор-Лёд» активно используется Министерством чрезвычайных ситуаций России для обеспечения безопасности движения по льду, а также в различных ледомерных работах, описанных в работах Ничипоренко Н. Т., Сиваченко Б. Н., Бибикова М. Ю., Никитина В. А.

В то же время исследований, направленных именно на применение георадаров для изучения строения дна и донных пород с поверхности льда, сравнительно немного. Лишь отдельные публикации содержат результаты подобного рода исследований. Так, их можно встретить в трудах Liu L., Arcone S., Finnegan D., Хаптанова В. Б., Башкуева Ю. Б., Дембелова М. Г., Родионова А. И., Рязанцева П. А., где помимо исследований толщины и структуры льда, также были определены границы дна и структура донных отложений. Moorman B. и Michel F. (1997) описали результаты батиметрической съемки озер в Канаде, где максимальная глубина исследования составила 19 м. Авторы Fu H., Liu Z., Guo X., Cui H. предложили применение радара с двойной частотой 100 МГц и 1500 МГц для одновременного исследования структуры льда и дна водного объекта. Карпов Д. В. и Семенов С. П. показали опыт применения георадара для изучения неглубоких (менее 2 м) пресных рек со льда в районе Ханты-Мансийска. Однако, их работа описана без анализа толщины льда, снежного покрова и условий профилирования. Аналогичные примеры встречаются и в других публикациях:

исследование донных отложений озера Неро со льда, опыт площадной съемки георадаром Лоза при изучении Челябинского метеорита (Копейкин В. В.). В работе Новиковой Ю. С. и Рязанцева П. А. на озере Имандре, авторами описаны структура ледяного покрова и параметры донных отложений, при глубине зондирования до 10 м и средней мощности льда 0,4 м.

В зарубежной литературе также отмечается преимущественная ориентация на исследования с поверхности воды. Это работы по изучению донных отложений реки Рейн и озера Боденское в Швейцарии (Huber E.), по анализу взвеси в реке Ракая, Новая Зеландия (Nobes D.), изучению морфологии поймы канала Такуари в Бразилии (Porsani J., Moutinho L.), а также исследований озера Куньмин в Китае (Zhang J. и др.).

Таким образом, несмотря на значительный опыт применения метода георадиолокации для изучения водных объектов, вопросы проведения исследований непосредственно с поверхности льда разработаны в меньшей степени по сравнению с исследованиями с водной поверхности. В научной литературе пока не сформирована единая система методических подходов и рекомендаций, обеспечивающих воспроизводимость и сопоставимость результатов, полученных в разные сезоны работ. В этой связи, цель диссертационного исследования заключается в разработке и обосновании методических решений, позволяющих повысить эффективность георадиолокационного изучения донных отложений водных объектов в зимних условиях.

Цель работы: оценить влияние параметров снежно-ледяного покрова на результаты георадиолокационного зондирования донных отложений пресноводных объектов Якутии и разработать методические подходы по повышению качества и достоверности регистрируемой информации.

Основные задачи исследования:

1. Сделать аналитический обзор современных методов и технических средств георадиолокационных исследований водных объектов криолитозоны с

поверхности льда и выявить факторы, ограничивающие их эффективность для изучения состава, строения и свойств донных отложений.

2. Натурным экспериментом определить амплитудно-временные характеристики георадарного сигнала с частотами 150, 250 и 400 МГц в системе «снежный покров – лед – вода – донные отложения» с учетом изменчивости мощности снежного и ледяного покрова при зондировании донных отложений на участке реки Лены.

3. Численным моделированием реконструировать формирование георадарного сигнала на зимних водных объектах в зависимости от электрофизических свойств и геометрических параметров снежно-ледяного покрова, для оценки возможностей метода в изучении физических свойств и мощностей сезонно-мерзлых донных отложений.

4. Разработать и обосновать эффективность нового технического средства для полевых исследований – антенной платформы с нормированным изменением высоты для снижения уровня помех при георадиолокационном изучении строения и свойств донных отложений со льда методами натурного и численного моделирования.

5. Разработать и апробировать методику зимних георадиолокационных исследований для мониторинга и картирования донных отложений рек и озер Якутии с целью оценки их ресурсного потенциала (на примере поиска палеонтологических объектов) и инженерно-геологических условий залегания подводных линейных инженерных объектов.

Методика исследований. Исследования базируются на использовании георадиолокационной аппаратуры с широкополосными приемо-передающими антеннами для генерирования и последующей регистрации электромагнитных импульсов, распространенных через модельные среды с различными электрофизическими свойствами. Натурные исследования проводились на участках рек Лены и Колымы, а также на озерах Центральной Якутии и на участке речного перехода газопроводной магистрали. Для охвата практически всего частотного диапазона георадиолокации и одновременного сопоставления данных в

процессе выполнения экспериментальных измерений использован широкий спектр современной георадиолокационной аппаратуры. Перечень имеющейся аппаратуры для регулярных наблюдений: «ОКО-3» с антеннами 150, 250, 400 МГц. Поставленная задача по физическому моделированию с воздуха на разных высотах решалась с помощью разработанного антенного устройства, выполненного из радиопрозрачных материалов. Антенное устройство представляет собой сборную конструкцию с подъемной платформой, на которую крепится антенный блок георадара.

Научная новизна и практическая значимость

1. Впервые для условий криолитозоны проведена серия мониторинговых наблюдений, в которых исследовано распространение электромагнитных волн с центральными частотами 150, 250 и 400 МГц в гетерогенной системе «атмосфера – снежный покров – пресный лед – вода – донные отложения», с учетом изменения условий зондирования в течение зимнего периода и позволяющие прогнозировать эффективность исследований свойств и строения донных грунтов.

2. Установлена взаимосвязь между толщиной, структурой, диэлектрической проницаемостью сезонно-мерзлых покровов водных объектов криолитозоны (снег, лед) и глубиной зондирования георадарного сигнала, что определяет возможности метода при оценке мощности и строения донных отложений пресных водных объектов.

3. Установлено, что при толщине льда более одного метра и наличии снежного покрова уменьшается уровень помех от трещин и верхней границы льда, что обеспечивает более надежную интерпретацию георадарных данных о строении донных отложений.

4. Разработано и апробировано новое техническое средство для полевых исследований – платформа, обеспечивающая регулирование высоты антенного блока, эффективность которой обоснована минимизацией естественных помех, возникающих во льду, что повышает достоверность георадиолокационного изучения строения донных отложений со льда.

5. Впервые предложен и апробирован методический подход к выявлению палеонтологических объектов (ископаемой мамонтовой кости) в донных отложениях с использованием георадара на основе морфологических признаков, служащих косвенными критериями оценки их ресурсного потенциала.

Практическая значимость работы

1. Разработано и внедрено новое техническое средство для полевых исследований – специализированная антенная платформа, позволяющее повысить качество данных, за счет уменьшения погрешности при регистрации донных отложений пресноводных водоёмов с поверхности льда.

2. Обоснована методика исследования с использованием разработанной платформы с ледового покрова в качестве стабильной опорной поверхности, что обеспечивает высокоточную географическую привязку данных и позволяет проводить повторные съемки в единой системе координат. Это создает основу для мониторинга сезонных и многолетних изменений инженерно-геокриологических условий дна водоемов, необходимого при проектировании и эксплуатации подводных сооружений (трубопроводов, кабельных трасс, опор мостов).

3. Предложен и апробирован высокоэффективный метод картирования и оценки ресурсного потенциала донных отложений. На примере р. Колымы показана возможность дистанционного выявления участков, перспективных на наличие палеонтологических объектов (ископаемая мамонтовая кость), что позволяет оптимизировать планирование и проведение поисково-оценочных работ, повышая их экономическую эффективность и снижая экологическую нагрузку.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что при георадиолокационном зондировании антенной с центральной частотой 150 МГц с поверхности пресного льда толщиной до 0,25 м эффективность не снижается по сравнению с зондированием с открытой воды, что подтверждает возможность его использования при исследовании донных отложений пресных водных объектов криолитозоны.

2. Предложен методический подход георадиолокационного зондирования с применением специализированной платформы, позволяющий

повысить горизонтальную разрешающую способность и качество регистрируемых данных о строении донных отложений, за счет повышения соотношения амплитудных значений сигнал/шум.

3. Доказана эффективность георадиолокации со снежно-ледяного покрова с использованием антенны частотой 150 МГц для мониторинга и картирования участков донных отложений р. Колымы, перспективных на наличие ископаемой мамонтовой кости, по характерным морфологическим признакам на радарограммах при глубинности зондирования до 12 м.

Личный вклад автора. Представленные в диссертационной работе экспериментальные и аналитические результаты выполнены непосредственно автором. Автор принимал личное участие во всех этапах исследований, включая определение методических особенностей георадиолокации, обработку и интерпретацию данных измерений, систематизацию и научный анализ полученных результатов.

Апробация работы. Результаты исследований апробированы на 11 научных конференциях: Молодежная конференция школа-семинар ИМЗ СО РАН 2022, 2023, 2025, г. Якутск; Молодежная конференция ЯНЦ СО РАН 2022, 2024, г. Якутск; ВНПК «Электроразведка 2022», ВНПК «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ», ВНПК «Георадар 2023», г. Москва (участие онлайн); Аспирантские чтения 2023, г. Якутск; ВНПК «ИГИ в строительстве», г. Москва; НПК в ИГАБМ СО РАН 2024; Молодежная конференция о науках о Земле, Новосибирск 2024; II Арктический конгресс, Якутск 2024; VII ВНПК «Геомеханические и геотехнические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» 2025 г., Якутск.

Список публикаций по теме диссертации в журнальных изданиях из перечня ВАК:

1. Горохов И. В. Оценка влияния сезонного льда и снега при георадиолокационном зондировании водных объектов суши на примере реки Лены

/ И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Успехи современного естествознания. – 2025. – № 8. – С. 56–63.

2. Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2025. – № 71 (1). – С. 74–86. – DOI 10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86.

3. Патент № 226629 U1 Российская Федерация, МПК G01V 3/15, G01S 13/88, H01Q 1/12. Платформа для антенного устройства георадара : № 2024110513 : заявл. 17.04.2024 : опубл. 14.06.2024 / И. И. Христофоров, И. В. Горохов, К. П. Данилов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук.

4. Патент № 2825556 C1 Российская Федерация, МПК G01V 3/15, G01S 13/88, H01Q 1/12. Способ зимнего георадиолокационного исследования подводных объектов : № 2024110515 : заявл. 17.04.2024 : опубл. 27.08.2024 / И. И. Христофоров, И. В. Горохов, К. П. Данилов; правообладатель ФБГУН ИМЗ СО РАН.

Статьи и тезисы в прочих изданиях

1. С дроном за мамонтами / Е. С. Петухова, И. И. Христофоров, М. Ю. Чепрасов // Природа. – 2023. – № 07. –DOI 10.7868/S0032874X23070013. [и др.]

2. Особенности георадиолокации пресноводных водоемов криолитозоны в зимний период / И. И. Христофоров, К. П. Данилов, И. В. Горохов [и др.] // «Георадар 2021» : сборник докладов научно-практической конференций / под ред. М. С. Судаковой, М. Р. Садуртдинова. – М. : Издательский дом Академии Естествознания, 2022. – С. 104–107.

3. Христофоров, И. И. Исследование влияния толщины льда на георадиолокацию донных отложений рек и озер в зимний период / И. И. Христофоров, К. П. Данилов, И. В. Горохов // Мониторинг в криолитозоне :

сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов / под ред. Р. Г. Мотенко. – М., 2022, – С. 441–443.

4. **Горохов, И. В.** Результаты физического моделирования георадиолокационного зондирования донных отложений пресноводных водоемов в зимний период / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Электроразведка 2022 : сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 26–28 октября 2022 года. – Москва : Издательский Дом «Академия Естествознания», 2023. – С. 169–176.

5. **Горохов, И. В.** Особенности георадиолокации пресноводных водоемов с поверхности льда / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии : материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 150-летию и 100-летию со дня рождения ученых-мерзлотоведов Михаила Ивановича Сумгина и Кирилла Фабиановича Войтковского, Якутск, 27 июня – 07 июля 2023 года. – Якутск : ИМЗ СО РАН, 2023. – С. 17–19.

6. **Горохов, И. В.** Предпосылки применения метода георадиолокации для обнаружения бивней мамонтов на дне пресноводных водоемов криолитозоны / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию Академии наук Республики Саха (Якутия) и 40-летию геологоразведочного факультета СВФУ им. М. К. Аммосова, Якутск, 21–24 марта 2023 года. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, 2023. – С. 52–56.

7. **Горохов, И. В.** Результаты натурного эксперимента по георадиолокации с поверхности речного льда / И. В. Горохов, И. И. Христофоров // Аспирантские чтения–2023 : сборник материалов республиканской научной конференции, Якутск, 23 ноября 2023 года. – Якутск : Издательский дом СВФУ,

2024. – С. 18–20.

8. Картирование донных отложений реки Колымы методом георадиолокации при поиске ископаемой мамонтовой кости / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024 : материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия), Якутск, 26–29 марта 2024 года. – Новосибирск : Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук», 2024. – С. 446–449. – DOI 10.53954/9785604990100_446.

9. Опыт применения метода георадиолокации для поиска ископаемой мамонтовой кости на дне пресноводных водоемов бассейна р. Колымы / Е. С. Петухова, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата : сборник трудов III Всероссийской конференции, посвященной 25-летию Института проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, 10–13 сентября 2024 года. – Киров : Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. – С. 81–83. – DOI 10.24412/cl-37255-2024-1-81-83.

10. Горохов, И. В. Результаты поиска ископаемой мамонтовой кости на дне и в донных отложениях реки Колымы методом георадиолокации в зимний период / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Арктика – территория стратегических научных исследований : сборник трудов II Арктического конгресса, Якутск, 20–22 сентября 2024 года. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, 2024. – С. 64–67.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

1.1. Фундаментальные принципы и теоретическое описание работы георадиолокации

Георадиолокация в комплексе геофизических исследований представляет собой волновой метод, основанный на излучении импульсов электромагнитных волн. Физическая основа метода опирается на взаимодействии электромагнитных волн с материалами, обладающими различными электрофизическими свойствами, такими как диэлектрическая проницаемость, электропроводность и магнитная проницаемость (Финкельштейн, 1994; Гринев, 2005; Владов, 2005, Jol, 2009; Изюмов, 2008). Информативность данных георадиолокации зависит от качества регистрации сигналов, отраженных от границ раздела сред и объектов с различной природой. В большинстве исследуемых подповерхностных средах, разница в диэлектрической проницаемости является основным фактором, определяющим отражение сигнала. Данный контраст возникает вследствие изменения скорости распространения радиолокационных волн, где скорость обратно пропорционально зависит от диэлектрической проницаемости среды и описывается формулой 1.1 (Финкельштейн, 1994; Владов, 2005; Jol, 2009):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1.1)$$

где c – скорость света в вакууме, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Таким образом, измерив время двухстороннего прохождения отраженного сигнала и определив скорость распространения волны в среде, можно оценить глубину, на которой расположен отражатель (раздел границ, локальный объект) (Владов, 2005). Из этого следует, что одним из основных параметров для оценки эффективности метода является проникающая способность электромагнитной волны в исследуемую среду. Однако ее распространение в геологических средах

фундаментально ограничено затуханием сигнала по мере его распространения в геологической среде. Для описания поведения электромагнитного поля в вакууме используется представленная в таблице 1.1 система уравнений Максвелла (Ландау, 1982; Ним, 2005). В контексте георадиолокации рассматриваются формы уравнений без учета плотности свободных зарядов ($\rho=0$) в объеме среды и в дифференциальной форме представлены в таблице 1 (Владов, 2005; Ним, 2005).

Таблица 1.1 Уравнения Максвелла

Закон Гаусса для электрических полей	$\nabla^* E = \frac{\rho}{\epsilon}$, при $\rho=0 \nabla^* E = 0$	P – плотность свободных зарядов, E – напряженность электрического поля, ∇ – оператор Гамильтона
Закон Гаусса для магнитных полей	$\nabla^* B = 0$	B – магнитная индукция
Закон Фарадея об индукции	$\nabla^* E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	Описывает изменение магнитного поля во времени t
Закон Ампера-Максвелла	$\nabla^* H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	H – ротор напряженности магнитного поля, J – плотность электрического тока, D – электрическая индукция

Представленные уравнения дополняются соотношениями, которые описывают, как поле электрического смещения (индукция) D и магнитное поле B реагируют на приложенные электрические (E) и магнитные (H) напряженности поля в конкретном материале, а также законом Ома для проводящих сред и выглядят следующим образом (Ландау, 1982):

$$D = \epsilon^* E, \quad (1.2)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды;

$$B = \mu^* H, \quad (1.3)$$

где μ – магнитная проницаемость среды;

$$J = \sigma^* E, \quad (1.4)$$

где σ – электропроводность среды.

Так, в проводящей среде уравнение Ампера-Максвелла принимает вид (Финкельштейн, 1994; Гринев, 2005; Владов, 2005):

$$\nabla^* H = J + \frac{\partial D}{\partial t} = \sigma E + \epsilon \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (1.5)$$

При дальнейшем преобразовании с объединением уравнений Максвелла и использованием векторного тождества, для однородной изотропной среды получаются дифференциальные уравнения вида (Владов, 2005; Ним, 2005; Калинин, 2003):

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0; \quad (1.6)$$

$$\nabla^2 H - \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \quad (1.7)$$

Эти уравнения описывают затухающую электромагнитную волну в проводящей среде. Для гармонического сигнала, распространяющегося вдоль направления z, форма электрического поля записывается как (Владов, 2005):

$$E_z = E_0 * e^{-\alpha z} * e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (1.8)$$

где множитель E_0 – напряженность поля в начале распространения, $e^{-\alpha z}$ описывает экспоненциальное затухание α амплитуды волны с расстоянием z, множитель $e^{i(\omega t - \beta z)}$ описывает колебания волны, где β – фазовый коэффициент, t – время, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота и i – мнимая единица.

Итак, вышеописанная формула демонстрирует зависимость энергии поля на глубине от коэффициентов затухания и фазовой скорости, которые через свойства материалов решаются в следующем виде:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right)}; \quad (1.9)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}. \quad (1.10)$$

Данные выражения демонстрируют взаимодействие диэлектрических и магнитных свойств среды с ее проводимостью и роль частоты источника в затухании георадарного сигнала: чем выше частота, тем сильнее затухание.

Разрешающая способность георадара является таким же ключевым фактором, определяющим эффективность георадарных исследований, как и глубинность. Достигжение большего разрешения подразумевает собой способность радиолокационной системы различать два близко расположенных объекта, как

отдельные структуры в направлениях перпендикулярном поверхности (в вертикальной плоскости) и параллельном поверхности (в горизонтальной плоскости). Таким образом, разрешающая способность георадара может быть двух типов: вертикальная и латеральная.

Вертикальная разрешающая способность георадара определяется как минимальное расстояние по глубине, при котором две цели могут быть различимы на радарограмме как отдельные объекты. Иными словами, это наименьшая разница во времени прихода отраженных сигналов от двух объектов. На практике вертикальное разрешение чаще всего оценивается как четверть длины волны, поскольку отраженный сигнал от слоя толщиной менее четверти длины волны практическим не формирует отдельного пика на радарограмме и не может быть выделен из общего отклика. При этом длина волны, то есть расстояние, проходимое волной за один период колебаний, определяется отношением скорости распространения волны в среде к ее центральной частоте (Александров, 2017; Калинин, 2002; Jol, 2002).

$$\Delta_{\text{верт}} = \frac{\lambda}{4}; \quad (1.11)$$

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1.12)$$

где λ – длина волны, f – центральная частота антенны георадара, v – скорость электромагнитной волны в исследуемой среде.

Вертикальная разрешающая способность напрямую зависит от длительности передаваемого импульса, так, более короткий импульс характерен для высоких частот и приводит к лучшему разрешению. Высокочастотные антенны на практике способны обеспечить радарограммы, подходящие для обнаружения мелких объектов, таких как тонкие слои, трубы, кабели, пустоты и т. д.

Горизонтальная (латеральная) разрешающая способность характеризует минимальное расстояние между двумя объектами, расположенными в одной горизонтальной плоскости, при котором они могут быть определены как отдельные структуры. Основным понятием для оценки горизонтального разрешения является первая зона Френеля – объем пространства между антенной и целью, через который

проходит значительная часть энергии георадарного сигнала. Форма и размеры зоны Френеля определяются глубиной до цели h и длиной волны λ . В первом приближении радиус зоны Френеля r_F можно оценить как (Финкельштейн, 1994; Окорочков, 2008; Лещук, 1995):

$$r_F = \sqrt{\frac{h\lambda}{2}} \quad (1.13)$$

Эта формула отражает прямую связь между увеличением глубины и ухудшением горизонтальной разрешающей способности, выраженной в расширении зоны Френеля. По мере того, как сигнал проникает глубже, его эффективный след расширяется, снижая способность системы различать близко расположенные объекты в поперечном направлении.

Таким образом, более высокие частоты обеспечивают более высокое разрешение, но сильнее подвержены затуханию и рассеянию сигнала, что ограничивает их глубину распространения. Более низкие частоты имеют большую длину волны, что позволяет им проникать глубже, но при этом они теряют в разрешающей способности. Данная зависимость означает, что выбор частоты антенны имеет решающее значение в вопросах проектирования георадарных исследований, требующих уникальных решений и зависящих от поверхностных условий. На практике для комплексных исследований применяют многочастотный подход, совмещая антенны с различными частотами для оптимального соотношения разрешения и глубины.

1.2 Электрофизические свойства сред водного объекта, методика исследований и аппаратура

Электрофизические свойства воды, донных отложений, льда и снега являются основой для понимания процессов отклика сред водного объекта на воздействие электромагнитных волн. Эти свойства – диэлектрическая проницаемость, электропроводность и магнитная проницаемость определяют

скорость распространения волн и их затухание в среде, где удельное затухание определяет глубинность зондирования, а скорость используется для пересчета временной задержки (Владов, 2005). Дополнительным источником информации на радарограммах, служит контраст зарегистрированных сигналов, зависящий от тех же параметров сред, по которым можно эффективно картировать геологические слои, мерзлоту, инженерные объекты, деятельный слой на мерзлоте, ледяные покровы, а также обнаруживать скрытые объекты в средах. Данный факт означает, что достоверность интерпретации регистрируемых георадаром данных напрямую зависит от понимания физических основ и закономерностей реакции среды на воздействие электромагнитной волны.

Диэлектрическая проницаемость (ϵ) – это свойство вещества определяющее его способность накапливать электрическую энергию при воздействии внешнего электрического поля (Ландау, 1982). Эта способность обусловлена поляризацией материала (Владов, 2005; Ландау, 1982). Приложении поля связанные заряды внутри диэлектрика физически смещаются или поляризуются. Материал с высокой диэлектрической проницаемостью сильнее поляризуется в ответ на электрическое поле, тем самым накапливая больше энергии, в связи с чем введено понятие относительной диэлектрической проницаемости, которая определяется отношением абсолютной проницаемости вещества к проницаемости вакуума.

Для обеспечения стандартизированной меры того, насколько изменяется длина волны при переходе из вакуума в материальную среду, используется понятие показателя преломления электромагнитной волны. Использование понятия относительной диэлектрической проницаемости упрощает анализ георадиолокационных данных, нормализуя свойства материалов по отношению к универсальной константе – проницаемости вакуума (ϵ_0):

$$\epsilon_{\text{отн}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (1.14)$$

где $\epsilon_{\text{отн}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость, связывающая индукцию (D) с напряженностью поля (E) $D=\epsilon E$, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

В основном, диэлектрическая проницаемость не является постоянной величиной, она может варьироваться в зависимости от положения в среде, частоты и направления приложенного поля, а также влажности, температуры и других параметров. В связи с этим, ϵ рассматривается как комплексная функция угловой частоты приложенного поля:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega), \quad (1.15)$$

где $\epsilon'(\omega)$ – действительная часть, обозначающая способность к поляризации, $\epsilon''(\omega)$ – мнимая часть, обозначающая потери энергии.

Потери энергии ϵ'' определяются тангенсом угла отношения мнимой и действительной части [3–5]:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)}. \quad (1.16)$$

Мнимая часть диэлектрической проницаемости тесно связана с электропроводностью материала (σ) и выражается формулой:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon'\epsilon_0}. \quad (1.17)$$

Несмотря на то, что диэлектрическая проницаемость по своей природе является комплексной и частотно-зависимой величиной, на практике в диапазоне частот, характерных для георадиолокации от 1 МГц до 1 ГГц, действительная часть для большинства горных пород изменяется относительно слабо и может рассматриваться как квазипостоянная величина (Владов, 2005). В то же время мнимая часть, определяемая электропроводностью, во многих слабо проводящих средах оказывается незначительной, что обеспечивает эффективность применения георадиолокации (Владов, 2005).

Электропроводность, в свою очередь, является основной причиной затухания сигнала, поскольку свободные ионы в проводящих материалах позволяют возникать току, что рассеивает энергию волн. На практике, данное

явление имеет несколько важных следствий, заключающихся в ограничении проникновения и в сложности интерпретации.

Электропроводность является ключевым свойством на водных объектах, определяющим глубинность зондирования. Электропроводность воды является параметром, определяемым комплексным воздействием физико-химических свойств сред, в первую очередь минерализацией, зависящей от концентрации растворенных солей, которые выступают в качестве носителей заряда. Чем выше концентрация свободных ионов, тем выше электропроводность. В отличие от воды в жидкому состоянии, пресный лед обладает крайне малой электропроводностью (порядка 10^{-7} См/м), что делает его практически изолятором и плохим проводником тока. Данное явление объясняется тем, что в процессе кристаллизации воды различные примеси активно вытесняются из формирующегося ледяного кристалла, смещаясь и концентрируясь в остаточной жидкой фазе (Владов, 2005; Ландау, 1982). Морской же лед, обладает большими значениями электропроводности, достигающих до 10^{-1} См/м. Это связано с наличием рассольных включений, которые сохраняют жидкое состояние даже при отрицательных температурах.

Магнитная проницаемость является одной из трёх фундаментальных характеристик, описывающих однородную изотропную среду для распространения электромагнитных волн. Однако для большинства природных материалов, встречающихся на поверхности Земли, в частности льда, снега и воды, магнитная проницаемость близка к проницаемости вакуума. Это означает, что она, как правило, не оказывает значительного влияния на распространение электромагнитных волн в контексте георадиолокационных исследований. В таблице 1.2 представлены свойства сред, чаще всего встречающихся на водных объектах суши (криолитозоны) (Jol, 2009; Омельяненко, 2006; Нерадовский, 2009; Титов, 2016).

Таблица 1.2. Электрофизические свойства сред водных объектов

Среда	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное электрическое сопротивление (Ом*м)	Электропроводность (См/м)	Типичная скорость георадарного сигнала (см/нс)
Воздух	1	10^{14}	10^{-14}	29,97
Сухой снег	1,1–1,8	$10^5 – 10^7$	$10^{-5} – 10^{-7}$	18–27
Влажный снег	1,8–9	10^4	10^{-4}	10–21
Вода очищенная	81	$10^4 – 10^6$	$10^{-4} – 10^{-6}$	3,3
Пресная вода	81	30–150	0,033–0,006	3,3
Чистый лед	3–3,2	10^7	10^{-7}	17
Песок сухой	3–9	$10^2 – 10^4$	$10^{-2} – 10^{-4}$	11–17
Песок водонасыщенный	15–25	40 – 400	0,025 – 0,0025	8–9
Илы	5–30	$10 – 10^2$	$10^{-1} – 10^{-2}$	7
Глины водонасыщенные	20–40	1–30	1 – 0,033	5–8

Представленная таблица содержит краткое сравнение свойств и демонстрирует причины, по которым георадиолокация по-разному работает в различных средах. Так, например значительный контраст между диэлектрической проницаемостью льда (3.2) и воды (81) объясняет сильные отражения, наблюдаемые на границе их раздела. Коэффициент отражения при этом рассчитывается формулой (Финкельштейн, 1994; Владов, 2005; Jol, 2009):

$$K_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}, \quad (1.18)$$

где ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость первой среды, ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость второй среды.

При вычислении коэффициентов отражения для каждой границы разделов сред в многослойной системе водного объекта в зимний период, можно оценить количество отражающейся энергии на каждой из них. Так, в таблице 1.3 представлены аналитически рассчитанные коэффициенты отражения и коэффициенты проникновения.

Таблица 1.3. Коэффициенты отражения и проникновения для типичных сред водного объекта в зимний период

Граница раздела двух сред	Диэлектрическая проницаемость (ϵ)	Коэффициент отражения ($K_{\text{отр}}$)	Коэффициент проникновения ($T=1-K$)
Воздух	1	0,084	0,916
Снег сухой	1,4	0,203	0,796
Лед пресный	3,2	0,66	0,33
Вода пресная	81	0,33	0,66
Влажные пески	20		

При дальнейшем анализе, помимо электрофизических свойств, как факторов, определяющих распространение и, в целом, эффективность исследований, можно выделить ряд не менее важных параметров, встречающихся в реальных условиях. Одним из таких факторов являются внутренние свойства льда. Скорость распространения волн во льду не является фиксированной величиной, поскольку она динамически зависит от внутренних свойств, таких как пористость, плотность, температура, нарушенная структура и локальная слоистость. Присутствие незамерзшей воды во льду, значительно снижает скорость распространения волн и увеличивает диэлектрическую проницаемость льда. Примеси, особенно содержание отложений, также снижают скорость и увеличивают диэлектрическую проницаемость. Содержание газовых пузырьков, а также различных структурных нарушений (трещины, майны, лунки) отрицательно коррелируют с плотностью льда и помимо увеличения проницаемости, создают дополнительные отражения, что вызывает сигналы помехи, усложняющие интерпретацию данных.

Влияние взвешенных отложений в воде, также являются ограничивающим эффективность фактором. Их присутствие в водной толще увеличивает затухание сигнала, тем самым снижая достижимую глубину проникновения для георадара. Высокие концентрации мелкодисперсных отложений, таких как ил, глина или известняк в воде и подстилающих отложениях могут значительно снизить качество регистрируемых данных (Ryazantsev, 2021; Лаломов, 2017). Даже если вода сама по себе химически пресная, высокая мутность или илистое/глинистое дно могут серьезно ограничить глубинность исследований, делая зондирование трудным или

даже невозможным. Поэтому при подготовке исследований, необходима оценка типа донных отложений и мутности воды.

Влияние поверхностных условий в зимний период сводится к параметрам снежного покрова водного объекта. Хотя сам снег, как правило, является диэлектриком и не представляет серьезной проблемы для распространения сигнала, его присутствие может незначительно ограничить глубину исследований. Но основными ограничивающими параметрами остаются влажность и толщина снежного покрова, которые напрямую влияют на количество энергии, достигающей подстилающего льда. Присутствие мокрой шуги также негативно сказывается на качестве данных, поглощая энергию сигнала. Помимо влияния на работу георадара, рыхлый толстый снег создает логистические проблемы для операторов съемки и может привести к плохому контакту между антенной и поверхностью. Дополнительно, к таким усложняющим факторам можно отнести экстремальные температуры, при которых оборудование, как правило не рекомендовано к использованию. Так, например георадар ОКО-3 компании «Логис-Геотех» гарантирует работоспособность оборудования в диапазоне температур от -20 до $+50$ С° («ОКО-3», 2018).

Анализ существующих георадарных систем показал, что практически все георадары конструктивно схожи и имеют аналогичные частотные диапазоны («ОКО-3», 2018; Копейкин, 2008; Cook, 1960; Geophysical Survey Systems, Inc.; Koden Electronics Co., Ltd; MALÅ GeoScience; OYO Corporation; Radar Systems, Inc.; Saxton, 1949; Sensors & Software; Transient Technologies; «Пикор-Лёд», 2016). Антенны в георадарах обычно используют радиоволны в достаточно широком диапазоне частот и варьируются в пределах от 1 МГц до 2000 («ОКО-3», 2018; Копейкин, 2008; Cook, 1960; Geophysical Survey Systems, Inc.; Koden Electronics Co., Ltd; MALÅ GeoScience; OYO Corporation; Radar Systems, Inc.; Saxton, 1949; Sensors & Software; Transient Technologies; «Пикор-Лёд», 2016). Наиболее распространенные георадарные системы состоят из таких основных компонентов, как импульсный генератор с передающей антенной, приемная антенна, блок управления и блок регистрации для сбора и обработки данных.

Собранные данные представляют собой сигналы, которые преобразуются в цифровую форму и обрабатываются для получения радарограмм – визуального отображения изменений электрических и диэлектрических свойств исследуемых сред.

1.3 Область решаемых задач на водных объектах методом георадиолокации

В истории становления метода георадиолокации, ключевую роль сыграли немецкие ученые Л. Лови и Г. Леймбах, установившие концепцию радиопросвечивания в 1910–1911 гг. Суть предложенного ими метода заключается в регистрации степени ослабления сигнала, проходящего через исследуемую среду, с использованием низких частот (Lowy, 1912; Annan, 2002; Хмелевской, 2010). Дальнейшим значимым этапом развития метода стали работы 1920-х годов, когда немецкий физик Хюлзенбек успешно применил принцип отражения сигналов для анализа времени прихода отражённых сигналов (Annan, 2002; Ним, 1994).

В 1960-х годах историческим событием стали экспедиции в Антарктику, где впервые авиационные локаторы позволили обнаружить границу под поверхностью льда (Annan, 2002). Позднее это было интерпретировано как граница между льдом и скальными породами. Эти открытия напрямую привели к созданию современных георадиолокационных систем.

Георадиолокационные исследования льда и снежного покрова акваторий. На сегодняшний день области применения георадаров достаточно широки. В частности, на пресноводных объектах одним из направлений является изучение толщины и внутренней структуры льда. Важность таких исследований обусловлена необходимостью обеспечения безопасности на зимних автодорогах и прогнозирования затороопасных участков на реках. Практическое применение данных о строении речного и озерного льда основывается на результатах картирования толщин и внутренней слоистости снежного и ледяного покрова. Уникальным преимуществом георадара по сравнению с прямыми методами, такими как бурение и визуальное наблюдение, является способность быстро

собирать данные на больших площадях. Для картирования чаще всего используется регулярная сетка профилей, шаг которой определяет точность и детализацию информации о распределении толщин и структурных особенностей льда. В более фундаментальных научных задачах ценность таких данных заключается в возможности дополнения климатических моделей, на основе которых оценивается реакция водных систем на изменения климата, прогнозируются риски и тенденции дальнейших изменений (Мачерет, 1980).

В СССР изучение внутренних параметров льда, его формы, размеров и свойств с использованием радиолокационных измерений проводилось группой учёных Рижского института инженеров гражданской авиации под руководством М. И. Финкельштейна. Первые натурные эксперименты были проведены в 1968 г. в устье реки Лены: В. Г. Глушнев использовал радиоимпульсный метод, а А. Б. Бабаев – частотный (Финкельштейн, 1984). В ходе дальнейшей разработки радиолокационных измерений была создана методика аэrolедомерной съёмки с использованием двух основных центральных частот – 4,3 ГГц и 9,6 ГГц, при которых минимальная регистрируемая толщина льда составляла 0,25 и 0,1 м соответственно (Финкельштейн, 1984).

В период с 1976 по 1978 гг. группой под руководством М. И. Финкельштейна были исследованы крупные реки и озёра Восточной Сибири – Лена, Олекма, Витим, Байкал. Измерения на реках в европейской части и Западной Сибири начали проводиться только в 1979 г., так как толщина льда в этих регионах на момент первых разработок была меньше минимального значения измерителя. Благодаря трудам М. И. Финкельштейна, А. П. Лазарева, Н.М. Жукова, А. Н. Чижикова и других были разработаны аппаратура, методика аэrolедомерной съёмки, а также методы обработки и интерпретации данных, что стало фундаментальной основой для дальнейшего развития георадиолокации.

Современное применение георадиолокации для изучения структуры речного льда предполагает использование антенн с частотами от 400 МГц до 1500 МГц, достаточными для оценки толщины льда и регистрации внутренней слоистости

всего покрова (Matzler, 1987; Han, 2023; Омельяненко, 2011; Федоров, 2014; Федоров, 2022).

В зарубежных исследованиях для определения толщины льда георадары часто используют в комплексе с летательными аппаратами, преимущественно вертолётами. Например, S. Acrone и A. Delaney применяли радары с центральными частотами 600 и 900 МГц, при этом минимальная регистрируемая толщина льда составляла 0,2 и 0,15 м соответственно (Arcone, 1987). В ранних работах зарубежных авторов, таких как Annan A. P., Davis J. L., Batson G., чаще использовались низкочастотные антенны (>250 МГц), которые обладали относительно низкой вертикальной разрешающей способностью и были недостаточны для профилирования льда в большинстве регионов умеренного климатического пояса (Arcone, 1987; Annan, 1977; Arcone, 1985; Arcone, 1986; Batson, 1984; Batson, 1984).

Помимо исследований сезонного льда и снега на водных объектах, георадар успешно применяется в гляциологических исследованиях. В условиях сокращения объёмов ледников Арктики использование георадиолокации является ключевым методом, позволяющим получать данные о толщине ледников и их внутренней стратиграфии. Способность георадара различать фазовые состояния воды внутри ледника нередко используется при оценке теплового состояния и гидрологической системы (Forte, 2014). Эти исследования позволяют оценивать стабильность ледников и их реакцию на климатические изменения.

Отслеживание динамики ледников особенно эффективно при использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дронов, что повышает мобильность метода и частоту измерений, увеличивая эффективность мониторинга. В литературе известны работы научных коллективов под руководством Ruols B., проводивших 4D-оценку изменений ледников. Результаты этих исследований позволили оценить формирование и эволюцию подледниковых каналов в условиях невозможности наземного профилирования (Ruols, 2023).

В целом, изучение внутренней стратиграфии и дифференциация электрофизических свойств снега и ледяных формаций, как по глубине, так и по

латеральному распространению, напрямую связано с ограничивающими факторами для георадара. Современные исследования в этой области направлены на изучение влияния электрофизических и механических параметров льда и снега на регистрируемые георадаром данные. При этом совершенствуются технологии обработки и интерпретации волновых разрезов с распознаванием типов льда, таких как торосовый, пластовый, фирновый и другие (Василенко, 1999; Beres, 1999; Мачерет, 2006; Zhao, 2016; Arcone, 1996; Forte, 2013; Glen, 1975; Evans, 1965).

Батиметрия и исследования строения донных отложений.

Георадиолокация как метод, предоставляющий данные о строении водного объекта, его глубине и морфологии дна, напрямую конкурирует с методами, основанными на распространении акустических волн. При сравнении этих подходов можно выделить их существенные различия в возможностях и ограничениях. Например, в условиях высоко минерализованных вод, включая морские исследования, явное преимущество имеют гидроакустические инструменты. Кроме того, глубинность акустических исследований значительно превышает возможности георадиолокации.

Использование георадаров с открытой воды требует адаптации методики, включая выбор плавсредств и конструкцию антенны. Так, компанией «Логис» были разработаны дипольные антенны «Тритон» с частотным диапазоном от 50 до 100 МГц для более глубоких исследований (Владов, 2000; Владов, 2007).

Однако в контексте изучения пресноводных объектов в зимний период георадарное профилирование предоставляет уникальную возможность непрерывного сбора данных с поверхности сезонно-мерзлых покровов (Ryazantsev, 2021; Khristoforov, 2021; Moorman, 1997). Сбор информации о строении ледяной толщи, структуре водного объекта и донных отложений с поверхности льда и снежного покрова становится перспективным направлением развития георадиолокации.

Использование льда в качестве стабильной платформы позволяет сочетать георадар с высокоточными спутниковыми системами и оптическим одометром, что обеспечивает корректное определение пройденных расстояний и направления

профилей при картировании водных объектов. Такой подход в перспективе может повысить точность отбора проб и географическую привязку донных структур, улучшая понимание различных гидродинамических процессов (Khristoforov, 2021; Moorman, 1997).

Анализ литературы показал, что в основном применения георадаров производится в контакте с открытой водой. Многочисленные работы на пресноводных акваториях представлены в трудах Владова М. Л., Старовойтова А. В., Карпова Д. В., Семенова С. П., Рязанцева П. А. (Владов, 2009; Ryazantsev, 2021; Владов, 2000; Карпов, 2012; Родионов, 2018). Опыт в гидрологии, в частности, при изучении галоклина в устьевых участках рек, описан в работах Крылова С. С., Боброва Н. Ю., Beres M., Haeni F. и др. (Бобров, 2009). Исследования донных отложений дражных полигонов с водной поверхности представлены в работах Куляндина Г. А. и Федоровой Л. Л (Федорова, 2010). Изучение сапропелей и донных отложений озер Карелии представлены в работах Рязанцева П. и Родионова А., а некоторые результаты, получены авторами выполнены с поверхности льда (Rodionov, 2018, Новикова, 2023). Так, в рассматриваемой статье с результатами использования георадара для картирования стратиграфических границ, условий осадконакопления и специфических особенностей донных отложений озера Полевское, буксировка георадара по льду было частью методологии. Наличие льда не обсуждалось как фактор, влияющий на эффективность работы георадара, однако, выбор частоты антенны – 150 МГц – обоснован, как оптимальное решение для получения данных через лед и снег.

При этом опыт других авторов в проведении зимних георадарных съемок описан в нескольких публикациях, связанных с применением георадаров для изучения строения дна водоемов именно со льда. В частности Карпов Д. В. и Семенов С. П. показали опыт применения георадара со льда для неглубоких (менее 2 м) пресных рек со льда вблизи Ханты-Мансийска, где по данным георадиолокации определен только рельеф дна, но не указана, ни толщина льда и снега, ни условия профилирования (Карпов, 2012). С поверхности ледяного покрова проведено изучение мощных донных отложений озера Неро, однако в этой

работе не был проведён анализ строения и состояния ледяной толщи, которая оказала негативное влияние на данные георадиолокации (Константинов, 2017). Опыт площадной съемки со льда георадаром «Лоза», при исследовании Челябинского метеорита продемонстрирован в работе Копейкина В.В., в которой по георадарным данным была выявлена граница рельефа дна озера на глубине 6–8 метров, но толщина льда и снежного покрова не описаны (Копейкин, 2014). Дополнительно, в статье Ермакова А. П., Старовойтова А. В. и Владова М. Л. рассматриваются георадарные измерения в зимних условиях тундры на поверхностях ручьев, озер и болот, которые потенциально представляют опасность в виде незамерзшей воды при движении тяжёлой техники и проведении сейсморазведочных работ. Эта работа вносит важный вклад в понимание возможностей и ограничений георадиолокационного картирования (батиметрии) водоёмов со льда, показывая, что с помощью GPR можно эффективно детектировать присутствие незамерзшей воды под ледяным покровом и картировать рельеф дна даже при тяжёлых полевых условиях.

Подобная тенденция прослеживается и в зарубежной литературе, где представлен опыт использования георадиолокации с поверхности воды для изучения донных отложений реки Рейн и Боденского озера в Швейцарии, исследования взвеси в реке Ракая в период половодья в Новой Зеландии, а также анализа морфологии поймы канала Такуари в Бразилии и озера Кунминг в Китае (Nobes, 2018; Porsani, 2004; Huber, 2018; Zhang, 2012; Hugenschmidt, 2018; Jol, 2004).

В части использования георадаров с поверхности льда, наиболее ярким из примеров являются испытания, проведенные Канадской компанией Sensors & Software на озере Метвен в зимний период. Ими представлена технология двухканальной конфигурации радара с частотами 500 МГц и 100 МГц для одновременного сбора данных о толщине льда и стратиграфии донных отложений (Sensors & Software). Однако, помимо демонстрации некоторых результатов, в описании испытаний не описаны глубина объекта, толщина льда и снежного покрова. В то же время, китайские исследователи Hui Fu, Xia Su, Sen Gao, Xinlei

Guo и Tao Wang также предложили систему с двухканальной конфигурацией с частотами 100 МГц и 1500 МГц (Fu, 2018). В представленной авторами работе подробно описаны методика и полученные результаты, которые содержат данные о погрешности георадарных измерений (0,12 м для глубины и 0,03 м для толщины), что относительно прямых методов (бурение лунок и эхолот) составила 3,97% и 4,32% соответственно. При этом толщина льда варьировалась от 55 см до 86 см, а глубина воды – от 113 см до 773 см.

Несмотря на наличие описанных успешных применений георадаров с поверхности льда и снега, прямое сравнительное исследование точности и эффективности георадарных исследований, учитывающих динамику нарастания толщины льда и снега, с детальным анализом преимуществ и недостатков определенных частот сигнала остается недостаточно освещенным в литературе.

Контроль состояния инженерных сооружений и обнаружение подводных объектов. Георадиолокационные исследования в комплексе геотехнического мониторинга являются относительно молодым направлением. Инженерные сооружения в водной среде, такие как, мосты трубопроводы, плотины и зимние автодороги подвергаются постоянному воздействию различных факторов, несущих деструктивный характер в стабильность состояния грунтов основания, а также непосредственно для самих объектов. Эти факторы могут приводить к деградации, размывам и внутренним дефектам, создавая определенные риски в безопасной эксплуатации таких сооружений. Традиционный комплекс методов контроля состояния сооружений в водной среде включает дайверскую инспекцию, эхолотные и сонарные системы и различные подводные аппараты с высокоразрешающей фото-телеметрией (Strock, 2009). Возможности георадиолокации в данном направлении предлагают неразрушающий подход для оценки состояния донных грунтов, а также самих сооружений как с открытой воды, так и со льда (Омельяненко, 2013).

Основная методика георадиолокационных исследований заключается в буксировании антенного блока на плавательном средстве с открытой воды, либо с применением снегоходов в зимний период. Частотный диапазон определяется

глубиной водных объектов и требуемым разрешением, зависящей от необходимой детальности и размеров искомого объекта. Наиболее распространенные частоты, описанные в трудах Омельяненко А. В., Христофорова И. И., находятся в пределах от 50 МГц до 400 МГц. Основной задачей данного подхода является обнаружение размывов. Способность георадаров обнаружить размыв грунта вокруг опор мостов, линий электропередачи трубопроводов и т. д., определяется оценкой изменений структуры донных отложений под влиянием русловых процессов и ледостава (Христофоров, 2008; Христофоров, 2011; Христофоров, 2011; Христофоров, 2010; Христофоров, 2013; Христофоров, 2008; Христофоров, 2009; Xu, 2006).

Перспектива использования георадаров со льда в инженерном приложении обладает определенной актуальностью, поскольку большинство технических, в том числе ремонтных работ на продуктопроводах, пересекающих глубоководные реки и озера, проводится в зимний период. При этом для уточнения местоположения трубопровода и других локальных объектов под водой, лед служит стабильным основанием, позволяющим значительно повысить географическую привязку данных.

Георадиолокация часто применяется и для поиска локальных объектов (моторных лодок, автомашин и пр.) как со стороны организаций и физических лиц, так и со стороны правоохранительных структур при расследованиях гибели людей на воде (Ruffell, 2021). Особое применение метод также получил в области палеонтологии, а именно в поисковых работах скоплений ископаемой мамонтовой кости в акваториях арктических водоемов. Обоснование эффективности применения георадиолокационного метода в палеонтологии описаны в работе Лукьянова С. П. (Лукьянов, 2007), а также в публикации Керемясова Н. В. (Керемясов, 2018), где кратко упоминается возможность применения георадаров при поиске ископаемой мамонтовой кости. В зарубежной литературе также встречаются единичные работы, связанные с однократным применением георадаров, где показана их эффективность при картировании аномалий скелетных остатков позднеплейстоценового мамонта, замороженных во льду (Горохов, 2025; Горохов, 2024; Горохов, 2024; Горохов, 2023).

Таким образом, спектр задач решаемых георадиолокацией на водных объектах, является достаточно широким и необходимым во многих научных и геотехнических исследованиях. Однако, несмотря на высокую эффективность метода, существует необходимость в детальном изучении влияния снежного покрова и льда на распространение сигнала. Перспективы дальнейших исследований и развития метода включают разработку более совершенных методик и алгоритмов обработки данных, для учета влияния многослойности сред на скорости распространения сигнала и точности измерений.

Выводы

Анализ рассмотренных исследований показал, что при проведении георадиолокационных работ со льда разные авторы выбирают частотные диапазоны исходя из конкретных задач – от детального картирования тонких слоев донных отложений до получения батиметрических данных на значительные глубины. В опубликованных примерах наибольшую эффективность демонстрирует использование комбинированных частотных конфигураций, позволяющих одновременно повысить глубинность и сохранить достаточную разрешающую способность.

Основными ограничивающими факторами для зимней георадиолокации являются влияние снега и льда, модифицирующие форму и энергию сигнала. Анализ электрофизических свойств сред показал то, что снег и лед сами по себе являются практически модельными диэлектрическими средами, однако их динамичная внутренняя структура, формирующаяся весь сезонный цикл, может значительно повлиять на качество регистрируемых данных. Существенные потери энергии сигнала происходят на границе сред «лед–вода» и в самой водной среде, где степень затухания сигнала экспоненциально увеличивается с глубиной.

Литературный обзор показал, что публикаций, связанных с применением георадаров для изучения строения дна водоемов со льда существует немного, и в них в основном представлены результаты, полученные с открытой воды. Тема применения георадаров со льда слабо разработана, поскольку не существует

общепринятых сформулированных методик или рекомендаций по применению метода георадиолокации при исследовании донных отложений рек и озер с ледяного покрова. Существующий материал требует систематизации и обобщения.

Таким образом, отсутствие практически обоснованных параметров эффективного георадарного зондирования водных объектов и их донных отложений, находящихся в мерзлом состоянии более шести месяцев в году, послужило основанием для формулировки цели исследования: оценить влияние параметров снежно-ледяного покрова на результаты георадиолокационного зондирования донных отложений пресноводных водоёмов Якутии и разработать методические рекомендации для повышения качества и достоверности регистрируемой информации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1 Сделать аналитический обзор современных методов и технических средств георадиолокационных исследований водных объектов криолитозоны с поверхности льда и выявить факторы, ограничивающие их эффективность для изучения состава, строения и свойств донных отложений.

2 Натурным экспериментом определить амплитудно – временные характеристики георадарного сигнала с частотами 150, 250 и 400 МГц в системе «снежный покров – лед – вода – донные отложения» с учетом изменчивости мощности снежного и ледяного покрова при зондировании донных отложений на участке реки Лены.

3 Численным моделированием реконструировать формирование георадарного сигнала на зимних водных объектах в зависимости от электрофизических свойств и геометрических параметров снежно-ледяного покрова для оценки возможностей метода в изучении физических свойств и мощностей сезонно-мерзлых донных отложений.

4 Разработать и обосновать эффективность нового технического средства для полевых исследований – антенной платформы с нормированным изменением высоты для снижения уровня помех при георадиолокационном

изучении строения и свойств донных отложений со льда методами натурного и численного моделирования.

5 Разработать и апробировать методику зимних георадиолокационных исследований для мониторинга и картирования донных отложений рек и озер Якутии с целью оценки их ресурсного потенциала (на примере поиска палеонтологических объектов) и инженерно-геологических условий залегания подводных линейных инженерных объектов.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СНЕГА И ЛЬДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1 Аналитический подход к определению влияния толщины снежного и ледяного покрова на результаты георадиолокационного зондирования

В прикладных задачах использование метода георадиолокации предполагает решение обратной задачи, заключающейся в определении границ отражения сигнала. Разрез с информацией о геометрии слоёв и объектов, зарегистрированных георадаром, отображается в виде волновой картины, составленной из множества трасс. Достоверность такой радарограммы определяется качеством обработки и интерпретации данных. Для преобразования её в геологический разрез необходимы сведения о строении и физических свойствах исследуемого объекта. Это означает, что глубокое понимание физики взаимодействия сигнала со средами позволяет существенно повысить достоверность интерпретации. В условиях водных объектов при прогнозировании результатов зондирования каждый слой системы может рассматриваться как однородная изотропная среда. В таком случае при решении прямой задачи основными параметрами, определяющими эффективность георадиолокации, являются электрофизические свойства сред, центральная частота сигнала и мощность сред.

Эффективное применение георадиолокации на водных объектах криолитозоны, покрытых сезонным льдом и снежным покровом, существенно усложняется добавлением дополнительных сред, характеризующихся изменчивостью их строения в течение всего холодного сезона. Помимо ключевых характеристик, таких как диэлектрическая проницаемость и электропроводность, определяющих скорость распространения волны, её отражение на границах раздела и степень затухания, дополнительное значимое влияние оказывает их мощность. Роль мощности снега и льда определяется её воздействием на распределение энергии в направлении зондирования. Так, например, на водных объектах в теплый период толщина водного слоя оказывает решающее влияние на результативность

зондирования за счёт экспоненциально возрастающего затухания сигнала в данной среде (Судакова, 2018). В свою очередь, в зимний период формируется граница между сезонным льдом и водой, способная отражать значительную часть зондирующего сигнала в зависимости от мощности мерзлого слоя. Сам широкополосный импульс можно рассматривать как комплексный сигнал, спектр которого состоит из множества частотных компонент, при этом энергетически значимыми считаются частоты в диапазоне центральной частоты, вплоть до уровня 0,5 по мощности от ее максимального значения. Иначе говоря, чтобы сохранить эффективность метода по глубине и разрешению, основная энергоёмкая часть спектра сигнала должна свободно проходить через границу лёд – вода, не испытывая существенного отражения. Следовательно, ключевым элементом методических подходов зимней георадиолокации акваторий является выбор сезона работ и центральной частоты антенны, обеспечивающей оптимальное соотношение между её частотой и мощностью ледяного покрова.

Таким образом, для оптимизации георадиолокационных исследований в зимних условиях и обеспечения точности регистрируемых данных необходимо рассчитать распределение энергии сигнала с учетом количества потерь в материалах, в зависимости от частоты волны и мощности слоев. При помощи формул расчета коэффициентов затухания и отражения можно определить ожидаемые результаты в динамичной многослойной системе сред, характерной для водных объектов в зимний период (Финкельштейн, 1994; Владов, 2005).

Физико-геологическая модель многослойной системы водного объекта в зимний период. Распространение электромагнитных волн определяется сложным взаимодействием сигнала со снежно-ледовым покровом и подстилающими их слоями.

В большинстве случаев в естественных условиях снег выступает первым слоем, модифицирующим амплитуду и частотный состав импульса в зависимости от его влажности и плотности. Сухой снег, рассматриваемый в работе, обладает низкой диэлектрической проницаемостью и минимальной проводимостью, слабо влияет на затухание, позволяя сохранять до 95 % энергии сигнала даже при

значительной мощности покрова (Omelyanenko, 2014; Узлов, 2014). По наиболее распространенным эмпирическим формулам, относительная диэлектрическая проницаемость сухого снега практически не зависит от частоты и определяется его плотностью. Так по формуле, установленной Tiuri M. E., диэлектрическая проницаемость описывается следующей зависимостью от плотности (Hallikainen , 1982):

$$\epsilon = 1 + 1,7 * \rho + 0,7 * \rho^2, \quad (2.1)$$

где ρ – относительная плотность снега, по отношению к плотности воды.

По модели Hallikainen M., формула диэлектрической проницаемости для сухого снега, зависящей от его плотности, выглядит следующим образом (Узлов , 2014; Hallikainen, 1982):

$$\epsilon = 1 + 1,9 * \rho. \quad (2.2)$$

Таким образом, при средних значениях плотности снега в диапазоне от рыхлого состояния ($0,1 \text{ г/см}^3$) до уплотненного состояния ($0,5 \text{ г/см}^3$), диэлектрическая проницаемость лежит в пределах от 1,2 до 2.

Более значительным препятствием для георадарного сигнала является ледяной покров, формирующийся поверх водного слоя. Основное ограничение проявляется за счет выраженного отражения зондирующего сигнала на границе с водой. Контраст диэлектрических свойств льда (3,2) и воды (81) вызывает отражение до 67 % энергии сигнала, что сокращает долю волны, проникающей вглубь. При этом затухание в самом ледовом массиве остается умеренным (Владов, 2017; Финкельштейн, 1984; Судакова, 2018). Диэлектрическая проницаемость пресноводного льда слабо зависит от температуры и равна $\epsilon = 3,15 \pm 0,05$.

Водный слой, расположенный подо льдом, является ключевым ограничивающим фактором глубины зондирования. Высокая диэлектрическая проницаемость (81) и проводимость воды приводят к затуханию сигнала, которое усиливается с увеличением частоты антенны. Так, на рисунке 2.1 представлена обобщенная физико-геологическая модель, водного объекта, покрытого сезонным льдом и снегом, с табличными значениями электрофизических свойств (Владов, 2005).

Для аналитического расчета распространения электромагнитных волн в средах с потерями, использованы формулы для расчета амплитуды плоской волны на выходе из среды (E_h) (Финкельштейн, 1994; Гринев, 2005; Владов, 2005, Jol, 2009; Изюмов, 2008):

$$E_h = E_0 * e^{-\alpha h}, \quad (2.3)$$

где E_0 – это амплитуда сигнала в начале распространения (на пикете 0), множитель $e^{-\alpha h}$ – отражает потери (α) в слое толщиной h .

Для оценки влияния каждого слоя в системе водного объекта, можно определить значения α для каждой среды, используя данные из таблицы, представленной на рисунке 2.1.

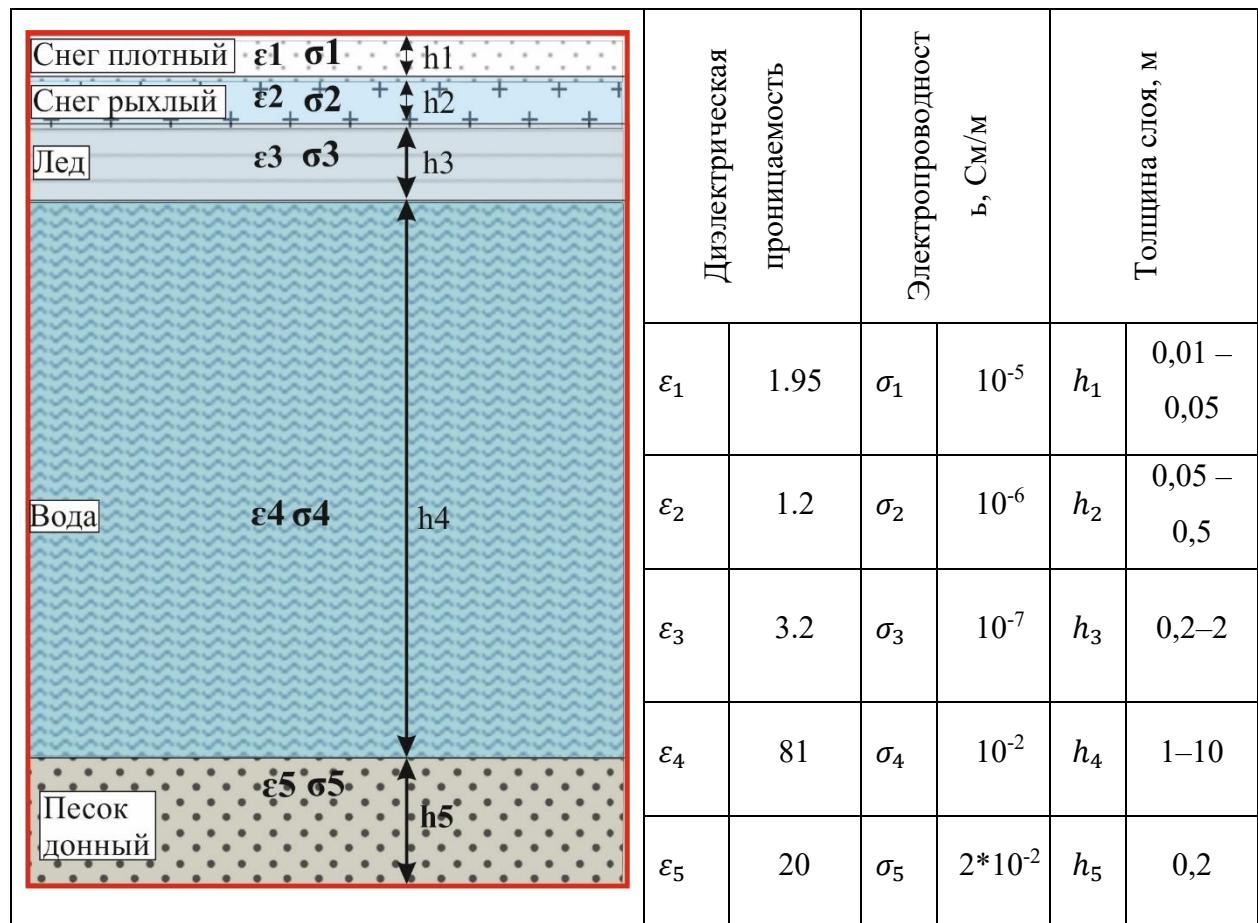


Рисунок 2.1 – Физико-геологическая модель водного объекта

Формула удельного затухания определяется в зависимости от величины диэлектрических потерь. При потерях меньше, чем 0,3, что справедливо для всех рассматриваемых сред используется формула (Финкельштейн, 1994; Гринев, 2005; Владов, 2005):

$$\alpha = \frac{27.3}{\lambda} * \sqrt{\epsilon * tg\delta}, \quad (2.4)$$

где λ – длина волны, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, $tg\delta$ – диэлектрические потери.

При этом тангенс угла потерь может быть вычислен по формуле (Владов, 2005):

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon'\epsilon_0}, \quad (2.5)$$

где σ – электропроводность среды, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, зависящая от частоты антенны, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме.

На основе полученных значений составлена таблица 2.1, включающая свойства сред, модифицирующих зондирующий сигнал георадара. Толщины сред выбраны в соответствии их характерным значениям в естественных условиях.

Расчеты произведены для волн с частотами 150 МГц, 250 МГц и 400 МГц. Полученные значения удельного затухания и потерь в таких средах, как уплотненный снег, рыхлый снег, лед и вода наглядно показывают, какая амплитуда сигнала сохраняется на момент выхода из слоя. При рассмотрении каждого слоя по отдельности, однозначно можно сделать вывод о том, что рыхлый и уплотненный снег, а также лед не создают значительных потерь на всех трех частотах. Коэффициент затухания в этих средах почти не зависит от частоты и остается практическим постоянным в данном диапазоне частот.

При более подробном анализе изменений, происходящих в водной среде, можно наблюдать огромную разницу амплитуд в очищенной (дистиллированной) воде и пресной речной воде. Дистиллированная вода характеризуется минимальными потерями сигнала, составляющими менее 2.7 % на глубине 5 м при частоте 150 МГц. Благодаря низкой проводимости, волна проникает глубоко в толщу такой воды, при этом частотная зависимость затухания остается слабой, что позволяет эффективно использовать антенны различных частот. В отличие от очищенной воды, пресная речная вода с удельным электрическим сопротивлением ~ 100 Ом \cdot м демонстрирует значительные потери сигнала. В данной среде четко

видна выраженная частотная зависимость затухания, когда высокочастотные компоненты затухают существенно быстрее низкочастотных.

Следовательно, влияние частоты на глубину зондирования становится критическим фактором при выборе антенны для конкретных условий. Для антенны с центральной частотой 150 МГц в речной воде на глубине 5 м сохраняется 18.2% от исходной амплитуды, что соответствует потерям 81.8%. Антенна с частотой 250 МГц обеспечивает компромисс между глубиной проникновения и разрешением. На глубине 5 м в речной воде сохраняется лишь 6% амплитуды. Антенна с частотой 400 МГц характеризуется максимальным затуханием в речной воде, где на глубине 5 м остаётся всего 2% от исходной амплитуды.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы лишь в пределах границ одного слоя. При прохождении электромагнитной волны через все слои дополнительные потери будут создавать границы раздела двух сред (отражение на каждой границе). Коэффициенты отражения на границах определяются формулой Френеля и для водного объекта с сезонно-мерзлым покровом представлены в таблице 1.3.

Таблица 2.1 Расчет коэффициентов затухания и количества амплитуды волны на выходе из слоя

150 МГц							250 МГц							400 МГц						
Снег уплотненный ($\varepsilon=1.95$; $\sigma=10^{-5}$)							Снег уплотненный ($\varepsilon=1.95$; $\sigma=10^{-5}$)							Снег уплотненный ($\varepsilon=1.95$; $\sigma=10^{-5}$)						
α , Нп/м	0.0014						α , Нп/м	0.0023						α , Нп/м	0.0036					
h, м	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	h, м	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	h, м	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
$e^{-\alpha h}$	0.999 97	0.999 958	0.999 9	0.999 9	0.999 92	0.999 902	$e^{-\alpha h}$	0.9999 5	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 8	$e^{-2\alpha h}$	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 8	0.999 8	0.999 7
Снег рыхлый ($\varepsilon=1.2$; $\sigma=10^{-6}$)							Снег рыхлый ($\varepsilon=1.2$; $\sigma=10^{-6}$)							Снег рыхлый ($\varepsilon=1.2$; $\sigma=10^{-6}$)						
α , Нп/м	0.0002						α , Нп/м	0.0003						α , Нп/м	0.0005					
h, м	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	h, м	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	h, м	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$e^{-\alpha h}$	0.999 99	0.999 98	1	0.999 9	0.999 92	0.999 9	$e^{-\alpha h}$	0.9999 9	0.999 97	0.999 9	0.999 9	0.999 9	0.999 9	$e^{-\alpha h}$	1.000 0	1.000 0	0.999 9	0.999 9	0.999 8	0.999 8
Лед ($\varepsilon=3.2$; $\sigma=10^{-7}$)							Лед ($\varepsilon=3.2$; $\sigma=10^{-7}$)							Лед ($\varepsilon=3.2$; $\sigma=10^{-7}$)						
α , Нп/м	0.00001						α , Нп/м	0.00001						α , Нп/м	0.00001					
h, м	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	h, м	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	h, м	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7
$e^{-\alpha h}$	1	0.999 995	1	1	0.999 99	0.999 983	$e^{-\alpha h}$	0.9999 98	0.999 995	0.999 991	0.999 989	0.999 985	0.999 983	$e^{-\alpha h}$	0.999 998	0.999 995	0.999 992	0.999 989	0.999 986	0.999 984
Вода дистиллированная ($\varepsilon=81$; $\sigma=10^{-4}$)							Вода дистиллированная ($\varepsilon=81$; $\sigma=10^{-4}$)							Вода дистиллированная ($\varepsilon=81$; $\sigma=10^{-4}$)						
α , Нп/м	0.0021						α , Нп/м	0.0035						α , Нп/м	0.0056					
h, м	5	4.25	3.5	2.75	2	1.25	h, м	5	4.25	3.5	2.75	2	1.25	h, м	5	4.25	3.5	2.75	2	1.25
$e^{-\alpha h}$	0.989 55	0.991 115	0.992 7	0.994 2	0.995 81	0.997 378	$e^{-\alpha h}$	0.9827	0.985 2	0.987 8	0.990 4	0.993 0	0.995 6	$e^{-\alpha h}$	0.972 4	0.976 5	0.980 6	0.984 7	0.988 9	0.993 0
Вода пресная ($\varepsilon=81$; $\sigma=10^{-2}$)							Вода пресная ($\varepsilon=81$; $\sigma=10^{-2}$)							Вода пресная ($\varepsilon=81$; $\sigma=10^{-2}$)						
α , Нп/м	0.342						α , Нп/м	0.57						α , Нп/м	0.912					
h, м	5	4.25	3.5	2.75	2	1.25	h, м	5	4.25	3.5	2.75	2	1.25	h, м	5	4.25	3.5	2.75	2	1.25
$e^{-\alpha h}$	0.182	0.240	0.308	0.396	0.507	0.648	$e^{-\alpha h}$	0.055	0.085	0.132	0.205	0.318	0.493	$e^{-\alpha h}$	0.021	0.042	0.083	0.215 1	0.162	0.318

2.2 Серия мониторинговых георадиолокационных наблюдений на водном объекте с учетом изменяющейся мощности сезонного ледяного и снежного покрова.

В рамках исследования, для оценки характера влияния параметров льда и снега с учетом динамики их толщин получены экспериментальные данные на акватории реки Лены. Участок исследований, как и большинство водных объектов, расположенных в зоне с влиянием многолетнемерзлых пород, начинает промораживаться с октября и остается под льдом более шести месяцев в году (Павлова, 2023). Такой длительный период ледостава создает динамическую многослойную систему из снега, льда, водного слоя и донных отложений. Данные изменения значительно усложняют проектирование и эффективное выполнение поставленных для георадара задач на водных объектах в зимний период.

В Республике Саха (Якутия), где выполнены натурные измерения, снежный и ледяной покров нарастают равномерно при стабильно отрицательных температурах в течение зимнего периода и их мощность на реках и озерах может достигать до 3-4 м суммарно, что усиливает влияние на эффективность зондирования (Донченко, 1987).

Натурный эксперимент проведен в период с ноября 2021 по апрель 2022 года, на мониторинговом полигоне, расположенном на протоце р. Лены в двух километрах от г. Якутска (рис. 2.2). Полигон обладал определенными и необходимыми параметрами, такими как нетронутый снежный покров, расположение возле берега, наличие границы рельефа дна на глубине не менее 5 м на начало зимнего периода. Основной задачей эксперимента являлось оценить разрешающую и проникающую способности георадарного сигнала с центральными частотами 150, 250 и 400 МГц с увеличением толщины снежного покрова и льда.

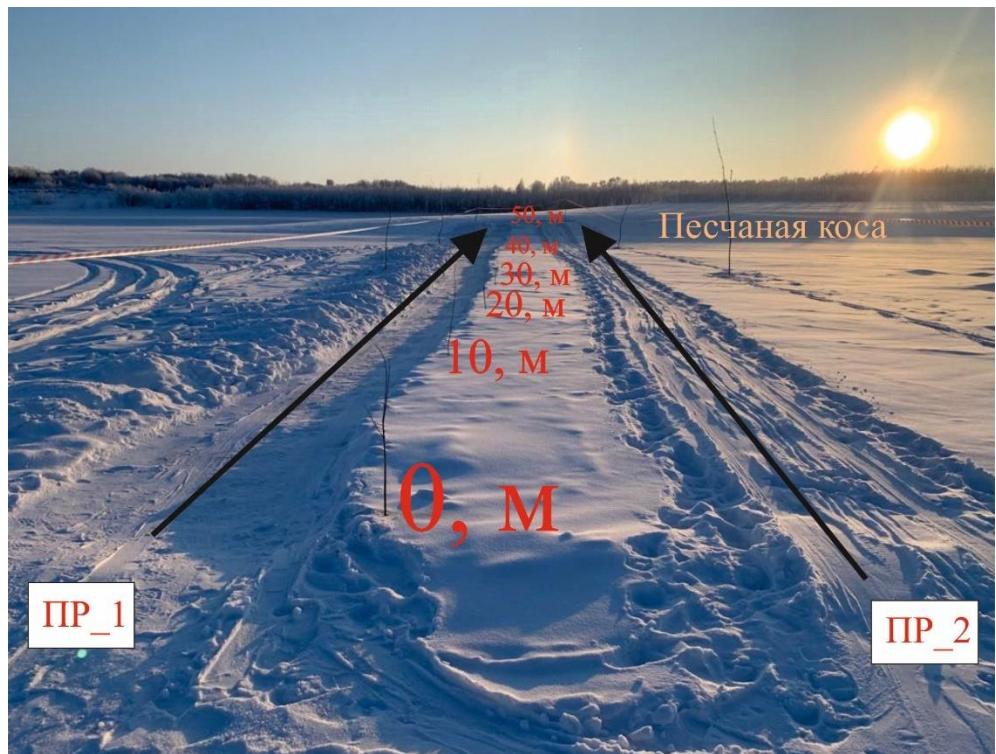


Рисунок 2.2 – Мониторинговая площадка

Измерения проводились по двум профилям. Длина профилей составляла 50 м, расстояние между ними < 2 м. Первый профиль представляет собой участок реки с искусственно очищенной поверхностью, на котором снежный покров полностью удалялся для минимизации его воздействия на сигнал. Толщина льда на момент начала цикла измерений составляла 0,33 м, а на конец достигла 1,3 м. Второй профиль сохранял естественный снежный покров, толщина которого варьировалась от 0,08 м в начале наблюдений до $\sim 0,35$ м в период максимального накопления. Мощность льда на втором профиле в конце цикла наблюдений достигла 1,13 м.

В процессе зондирования для минимизации погрешностей, связанных с естественной неоднородностью среды, толщина льда и снега дополнительно контролировалась ручным бурением и снегомерной рейкой, также применялся оптический одометр для максимально точного соблюдения дистанции и географической привязки (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Определение толщины и плотности снега

Изменение мощности мерзлых слоев в течении зимнего периода представлены в таблице 2.2. Всего в ходе исследований было выполнено 12 циклов измерений, в результате которых получено 72 радарограммы в контакте с поверхностью и 216 – на разных уровнях антенны относительно поверхности. Так, помимо традиционного способа сканирования, в рамках описанного эксперимента применялась антенная установка, использованная для нормированного подъема антенного блока над исследуемыми средами. Результаты применения антенной установки будут описаны в дальнейших главах работы.

Таблица 2.2 Мощность льда на всех этапах зондирований

Дата	30.11.21	02.12.21	15.12.21	12.01.22	27.01.22	04.02.22	24.02.22	05.03.22	10.03.22	17.03.22	08.04.22	15.04.22
Толщина льда на Пр 1	33	38	43	69	93	100	110	115	119	121	126	130
Толщина снега на Пр 2	8	10	18	21	22	22	25	28	28	31	32	35
Толщина льда на Пр 2	33	37	41	62	75	85	102	107	109	110	112	113

На рисунке 2.4 представлены радарограммы, полученные тремя антеннами в первый цикл измерений. Для наглядности все разрезы обработаны абсолютно одинаково, включая изменения контраста и яркости радарограммы. Использованные приемы обработки включали пикирование границ слоев, присваивание диэлектрической проницаемости (скорости волны) каждому слою, а также процедуры усиления сигнала по экспоненте до значений 1000 и выставление шкалы контраста равной 950.

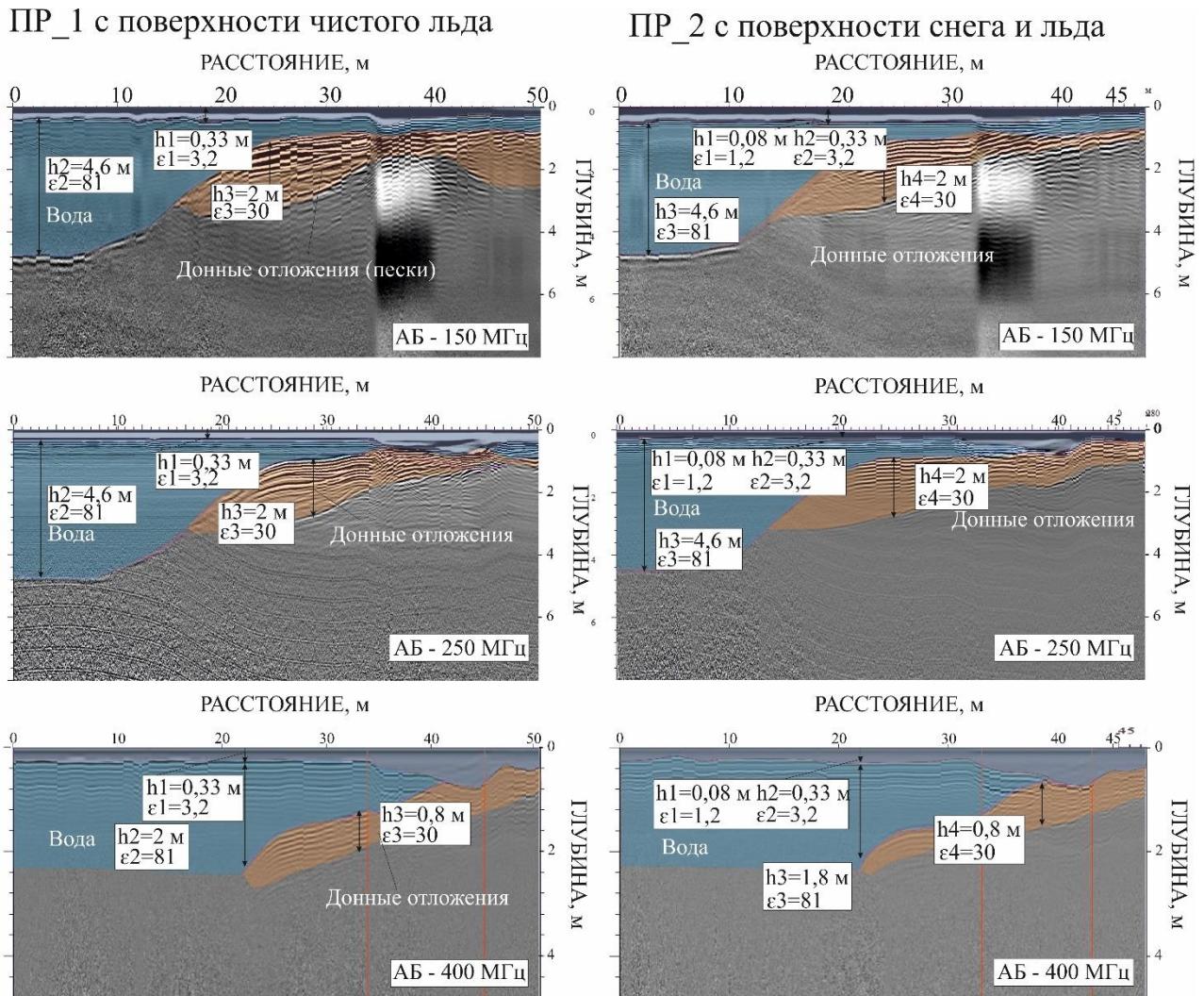


Рисунок 2.4 – Сравнение радарограмм антенн с центральными частотами 150, 250 и 400 МГц, полученных по профилю со снежным покровом и чистым льдом

В верхней части рисунка представлены георадарные разрезы, выполненные антенной АБ-150 МГц с очищенного от снега льда. В средней и нижней части расположены разрезы антенн АБ-250 МГц и АБ- 400 МГц соответственно. Толщина льда на обоих профилях составила 0,33 м, а снежного покрова – 0,08 м.

Все разрезы получены в контакте с поверхностью. Профилирование выполнялось поочерёдно каждой антенной. Для сохранения целостности снежного покрова на втором профиле, оператор приводил в движение антенный блок, находясь вне границ профиля. Направление было с глубоководной части в сторону песчаной косы. Контрольной границей при обработке и интерпретации данных являлась граница воды и донных отложений (песок).

Анализ полученных георадиолокационных разрезов показал, что антenna с центральной частотой 150 МГц позволяет регистрировать рельеф дна как высококонтрастную границу по всей длине профиля до глубины ~5 м. В верхней части разреза (0–100 нс) наблюдается лишь небольшой уровень помех. Строение прибрежных донных отложений характеризуется слоистостью, типичной для песчаных кос, тогда как на большей глубине донные отложения выглядят монолитными, без ярко выраженной слоистости.

Разрезы, полученные антенной АБ-250 МГц, визуально характеризуются более тусклыми амплитудами отражённых сигналов, однако рельеф дна на первом профиле прослеживается полностью. На разрезах со снежного покрова граница рельефа дна отображается заметно слабее по сравнению с данными, полученными со льда и с антенной АБ-150 МГц. На обоих профилях наблюдаются слабозаметные помехи в диапазоне 100 нс по временной шкале.

Разрезы антенны АБ-400 МГц показывают, что отражение от дна практически неразличимо на глубинах более 1 м. На данной частоте полезной информацией может быть только толщина льда и его внутренняя слоистость.

Таким образом, первичные результаты показали, что при толщине льда 0,33 м наиболее оптимальной антенной для зондирования донных отложений реки Лены в её среднем течении является АБ-150 МГц. Антenna с частотой 250 МГц может быть эффективно использована для картирования морфологии дна водных объектов глубиной до 5 м (Горохов, 2025).

150 МГц. Рассматривая результаты, полученные антенной АБ-150 МГц, можно наблюдать границу дна во всех циклах измерений по двум профилям. Это означает, что данная антenna обладает достаточной глубинностью, чтобы

зондировать пресные водные объекты глубиной 5 м и более. Так на рисунке 2.5 можно визуально оценить качественные характеристики отраженных сигналов. Слева представлены разрезы, полученные с поверхности чистого льда, а справа разрезы в контакте со снежным покровом. Необходимо отметить, что на первом профиле динамика увеличения толщины льда значительно выше. При максимально наблюденной толщине 1,3 м, мощность водного слоя составляла ~2,4 м. В результате сопоставления с толщиной слоев в начале эксперимента, получим прирост льда на 0,97 м и 0,8 м для первого и второго профиля соответственно. Водный слой в начале наблюдений составлял примерно 4,6 м. На втором профиле на конец измерений при толщине льда 1,13 м, мощность воды равняется ~2,7 м.

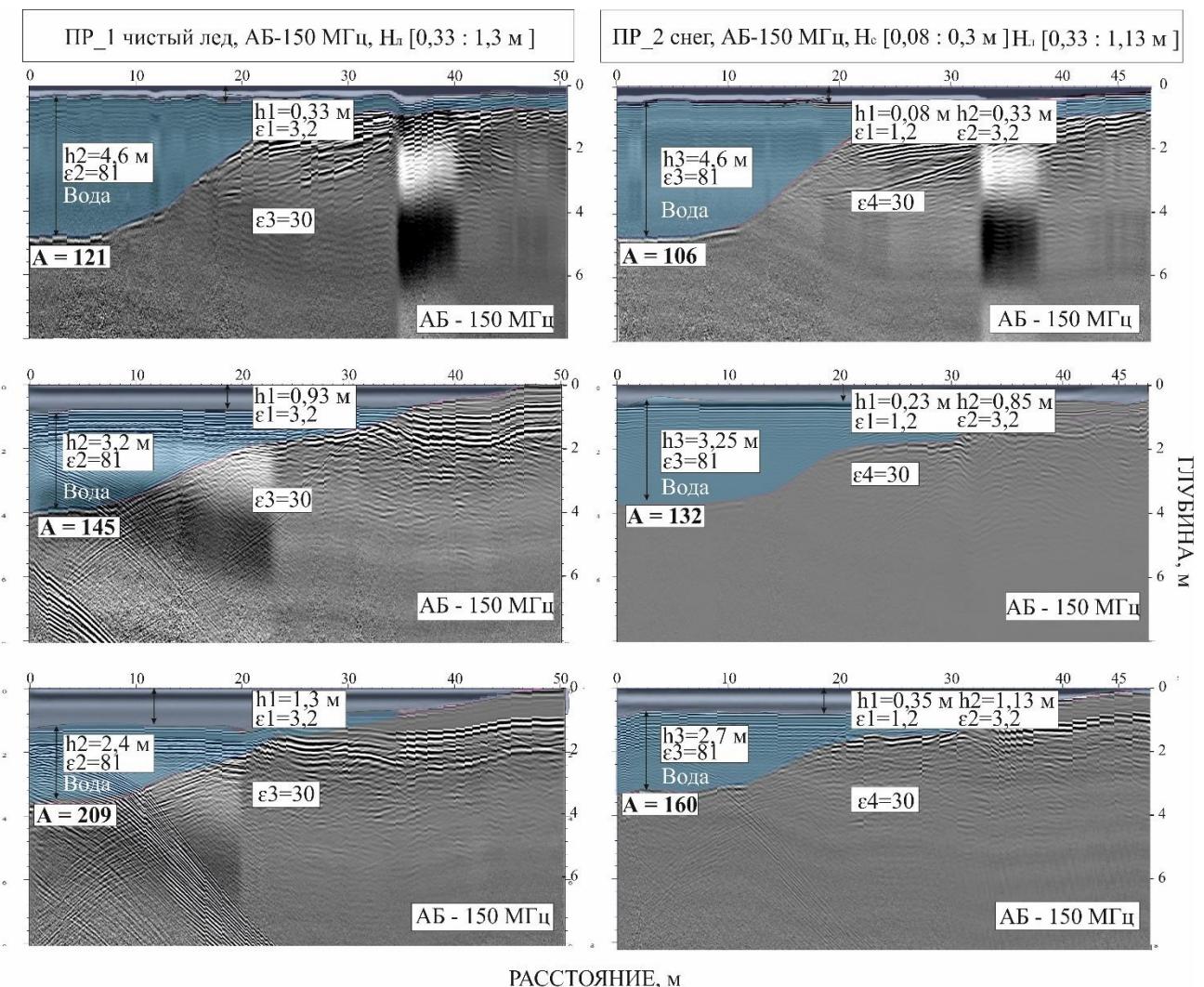


Рисунок 2.5 – Георадарные разрезы при разных толщинах снега и льда

Однозначно можно отметить увеличение амплитуд на границе «вода – донные отложения», при мощности льда более 1 м. В сравнении с результатами

первого наблюдения, значения отраженных амплитуд на профиле 1 (чистый лед) на конец наблюдений выросли в 1,5 раза.

Для количественного сравнения амплитуд отраженных на границе «вода – донные отложения» сигналов за весь период наблюдений построен график, представленный на рисунке 2.6.

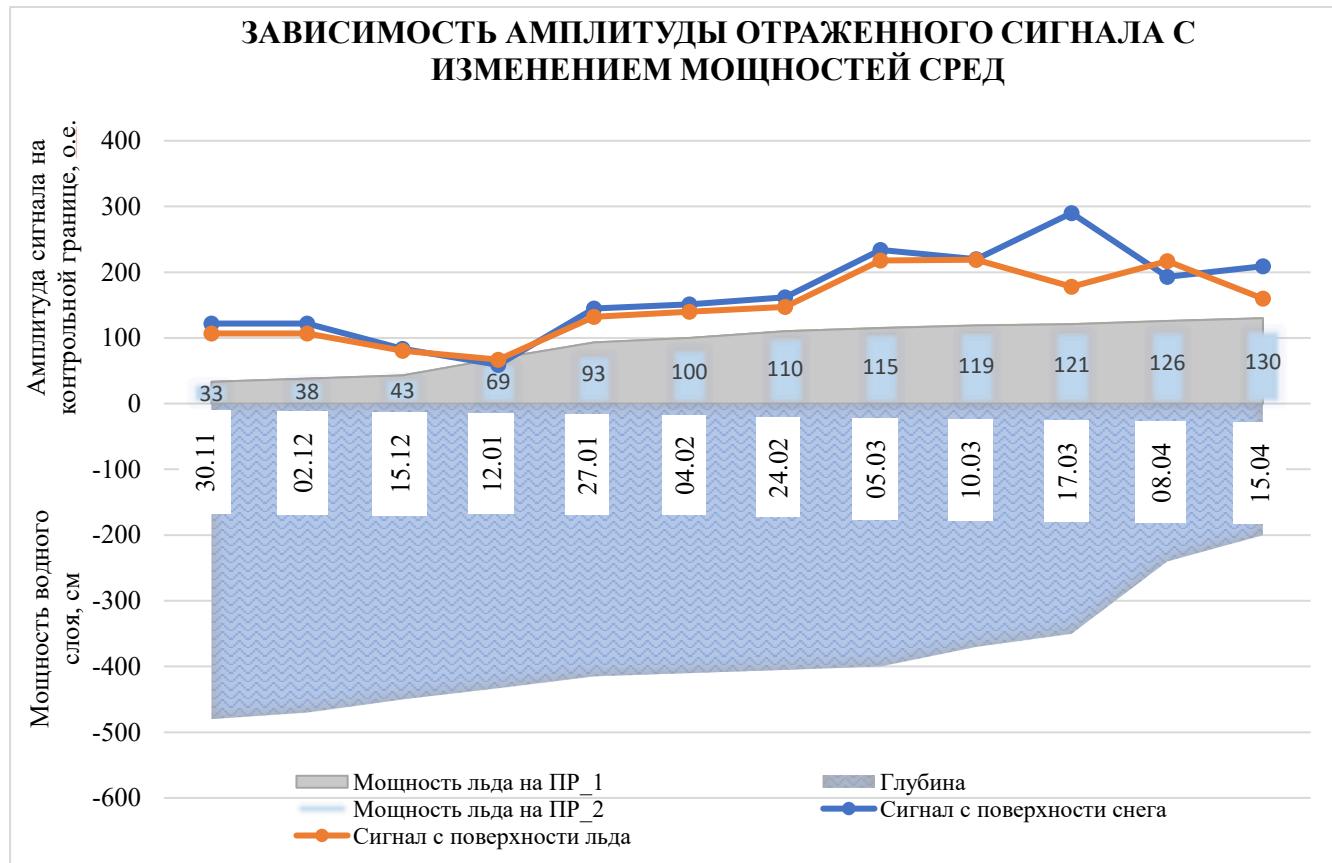


Рисунок 2.6 – Зависимость амплитуд отраженного сигнала от мощности льда и водного слоя

График наглядно показывает изменение амплитуд на контрольной границе по двум профилям. В результате количественной оценки можно отметить незначительную разницу амплитуд отраженных сигналов в зависимости от условий съемки. Во многом, наличие снежного покрова определяет характер и степень ледостава, в результате которого максимальная разница в наблюденных значениях мощности льда по обоим профилям составила 0,17 м. Однако, как показали аналитические расчеты, представленные в таблице 2.1, удельное затухание в слое льда составляет всего 0,001 дБ/м, это означает, что амплитуда сигнала при выходе из слоя льда затухает относительно весьма незначительно. Следовательно, можно

отметить минимальное влияние условно однородного льда на амплитуду сигнала. Отсюда следует, что основной вклад в установленную разницу наблюденных амплитуд отраженных волн внесли граница снега и льда и разница в мощности водного слоя, удельное затухание у которой для антенны АБ-150 МГц равно $\sim 2,8$ дБ/м. С учетом дополнительных потерь, вызванных отражением сигнала на границе снега и льда (табл. 1.3), можно сделать вывод о том, что на профиле со снежным покровом глубинность исследований ниже по сравнению с исследованиями, выполненными с чистого льда. Однако качественный анализ показал, что снежный покров позволяет сократить влияние помех, перекрывающих полезную информацию. В связи с этим, при выборе оптимальных условий георадарных зондирований, помимо ожидаемой глубины зондирования, необходимо учитывать наличие источников помех во льду. При их отсутствии расчистка снежного покрова может повысить глубинность исследований.

Как показывает график на рисунке 2.6, в диапазоне мощности льда от 0,43 до 0,69 м и в диапазоне глубины воды от 4,5 до 4,33 м, значения амплитуд отраженных сигналов на контрольной границе значительно уменьшаются для обоих профилей. Данный факт может быть объяснен расчетом длин волн в слое льда для спектра частот с центральной частотой 150 МГц (таблица 2.3). Для расчета длины волны и разрешающей способности использованы формулы 1.1, 1.11, 1.12, а значения пределов широкополосного сигнала взяты по уровню 0,5 от амплитудно-частотного спектра зондирующего сигнала с центральной частотой 150 МГц.

Таблица 2.3 Длина волны во льду на разных частотах георадарного сигнала

Антенна	Пределы частот, МГц	Длина волны, м	Вертикальная разрешающая способность ($\lambda/4$), м
АБ-150 МГц	75	2,24	0,56
	150	1,12	0,28
	225	0,75	0,19
АБ-250 МГц	125	1,34	0,34
	250	0,67	0,17
	375	0,45	0,11
АБ-400 МГц	200	0,84	0,21
	400	0,42	0,1
	600	0,28	0,07

Реальные данные также показали сопоставимые значения пределов частот. На рисунке 2.7 приведён пример определения спектра выделенного прямоугольника, соответствующего зондирующему сигналу, сформированному во льду мощностью 0,72 м. Нижний предел составил 75 МГц, что соответствует теоретическому значению, а верхний предел смешён в сторону низких частот и составил 215 МГц.

Таким образом, расчёт вертикальной разрешающей способности, определяемой длиной волны и выраженной как $\frac{1}{4} \lambda$, показал, что при мощности льда более 0,56 м возникает дополнительное отражение части энергетического спектра, соответствующей уровню 0,5. В результате этих дополнительных отражений амплитуда сигнала, отражённого на контрольной границе, снижается.

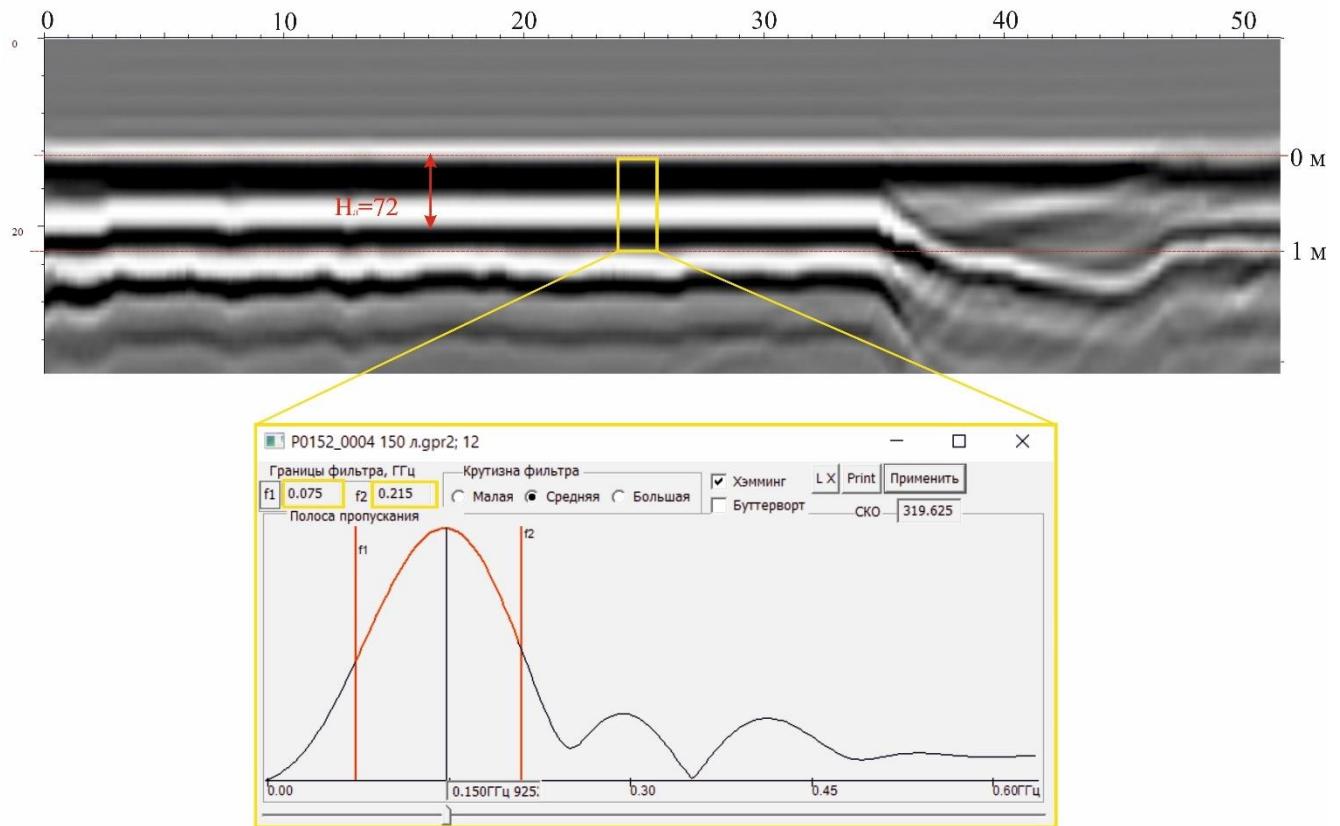


Рисунок 2.7 – Спектр частот зондирующего сигнала сформированного во льду

Анализ спектра частот на всех полученных радарограммах при разных мощностях льда и снежного покрова показал, что пределы, соответствующие половине энергетического уровня варьируются в диапазоне значений от 63 МГц до 255 МГц.

При толщине льда более 1 м, особенно в диапазоне от 1,2–1,3 м, наблюдается существенное повышение амплитудных характеристик отраженных сигналов до значений 290 о.е. и 217 о.е. Данное повышение обусловлено сокращением расстояния прохождения электромагнитной волны до контрольной границы. Однако в результате обработки и интерпретации данных, фактический материал представлен в виде сильно зашумленной радарограммы, на которой сложно проследить информацию на малых глубинах вследствие переотражений от слоя льда. Также радарограмма подвержена негативному влиянию помех, вызванных отражением от трещин, майн, лунок и других различных структурных нарушений льда.

250 МГц. Данная частота по аналитическим расчетам (таблица 2.1) обладает достаточной проникающей способностью – до 3 м. При анализе реальных данных, представленных на рисунке 2.8, можно наблюдать сопоставимый характер изменений амплитуд сигнала с амплитудами, полученными антенной АБ-150 МГц. Первое измерение при мощности льда в 0,33 м также показало достаточную глубинность, при которой можно однозначно определить рельеф дна, а также более детально изучить структуру донных грунтов в пределах 3-4 м. С увеличением льда до значений 0,93 м, зафиксировано схожее явление со снижением значений амплитуд, несмотря на уменьшение водного слоя.

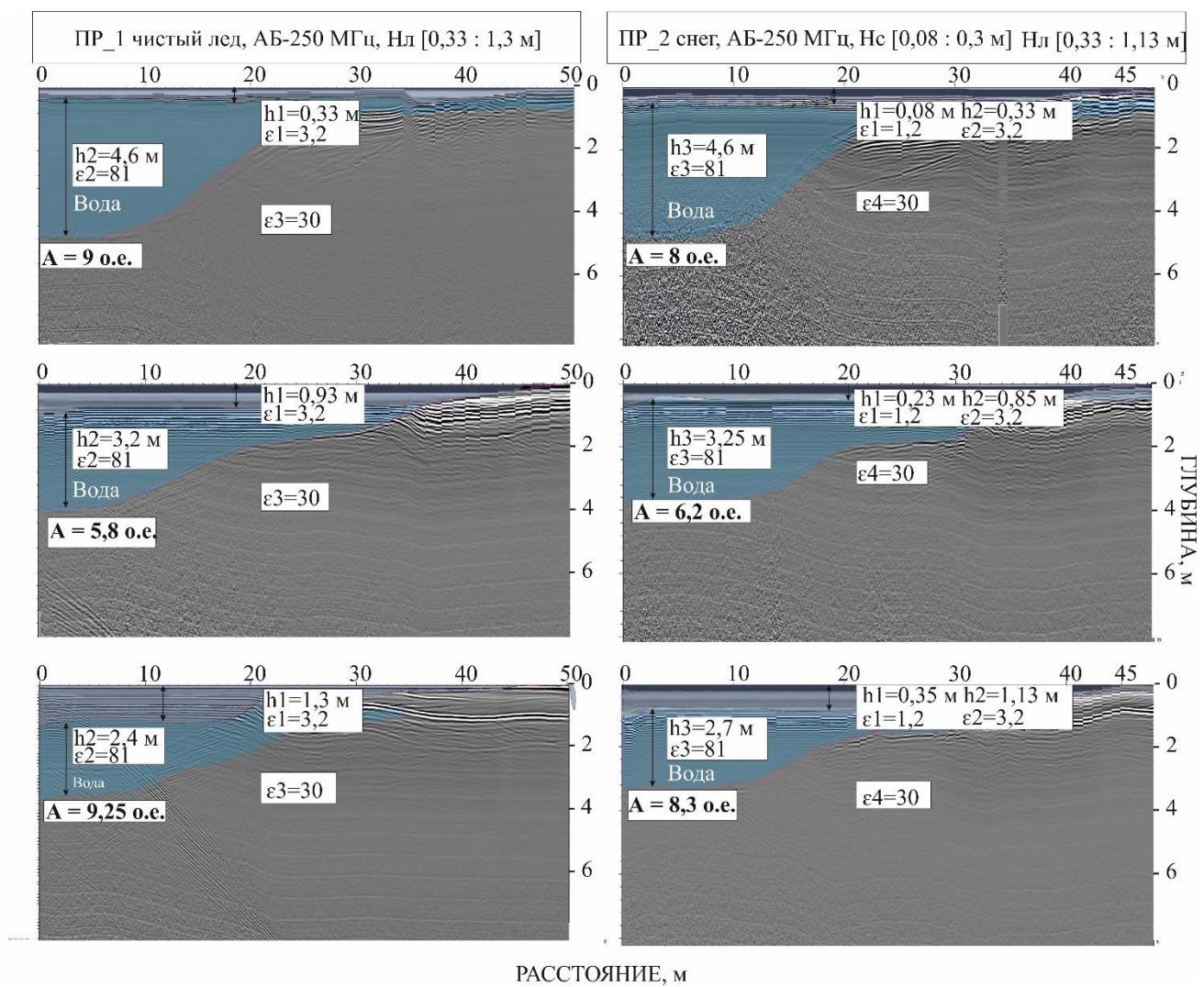


Рисунок 2.8 – Георадарные разрезы при разных толщинах снега и льда, АБ-250 МГц

При максимальной толщине льда 1,3 и 1,1 м, на обоих профилях амплитуда на контрольной границе – выше. Сравнение данных между профилями 1 и 2 установило, что снежный покров и более мощный водный слой уменьшают амплитуду отраженных волн, но, вместе с тем, практически отсутствуют сигналы-помехи, наблюдаемые с чистого льда. Структура донных отложений лучше просматривается в весенний период, когда уровень воды снижается. Исходя из этого, можно определить наиболее оптимальные условия, при которых эффективность георадиолокационных исследований достаточна для изучения морфологии дна, батиметрии и изучения структуры донных грунтов. Так, для глубоководных объектов комплексирование антенн 150 МГц и 250 МГц даст

достаточную информацию о рельефе дна на глубине более 5 м и детальную информацию о структуре донных отложений на глубине до 4 м.

400 МГц. Ключевой задачей, решаемой данной антенной на водных объектах зимой, является определение толщины и структуры льда. Как показали рассчитанные коэффициенты затухания и натурные данные, глубинность исследований на частоте 400 МГц невелика и составляет 2 м при небольших значениях сезонного льда и снега. При этом вертикальная разрешающая способность позволяет максимально детально проследить внутреннюю слоистость песчаных грунтов и самого льда. На рисунке 2.9 представлены разрезы, полученные антенной 400 МГц.

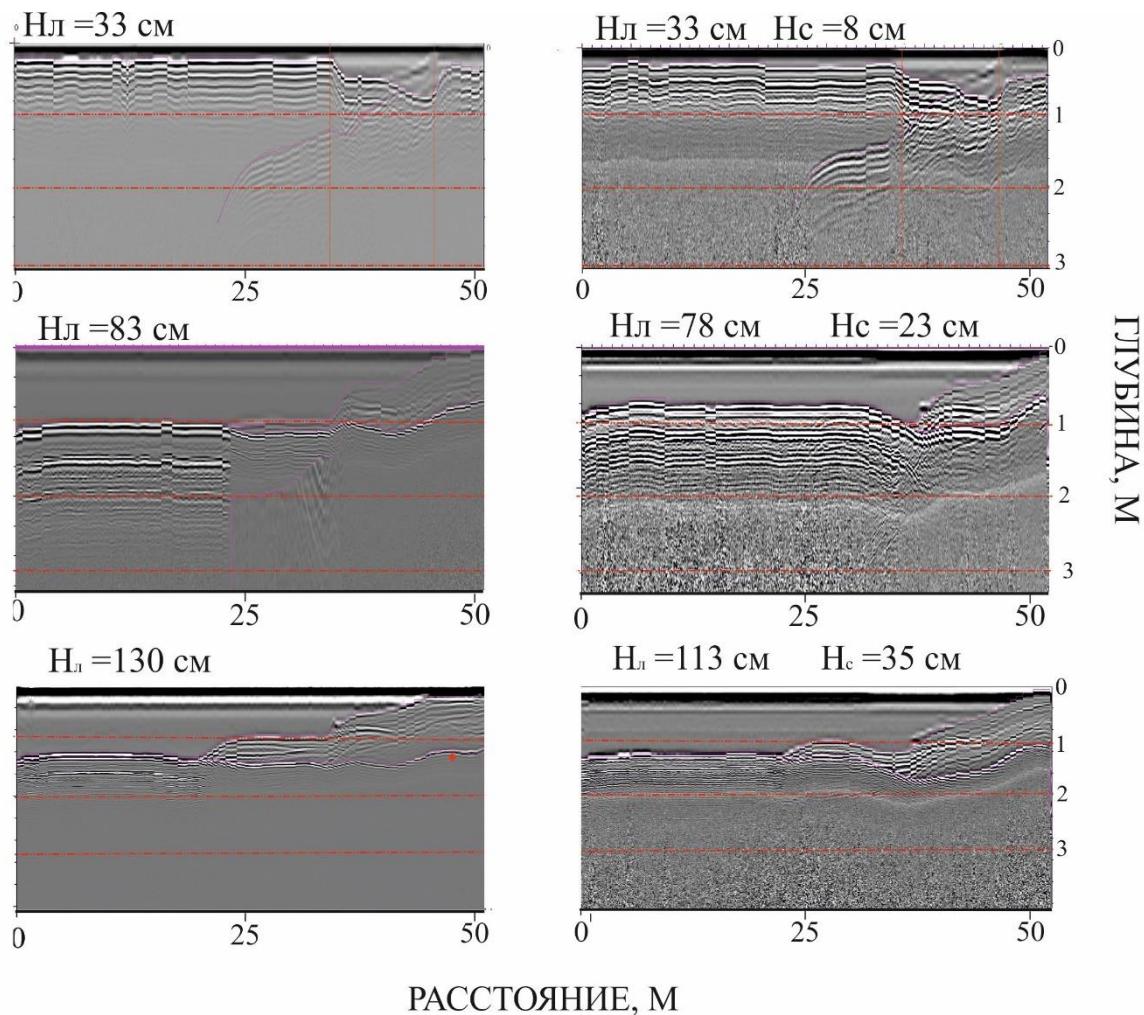


Рисунок 2.9 – Георадарные разрезы при разных толщинах снега и льда,
АБ-400 МГц

Исходя из полученных радарограмм, можно заключить, что наличие и утолщение снежного покрова до толщины более 0,2 м при общей толщине льда

свыше 1 м приводит к снижению амплитуды внутренних отражений. На радарограммах появляется заметная зашумленность, а контуры структурных особенностей становятся размытыми.

Таким образом, на основе аналитических и натурных данных можно однозначно утверждать, что георадиолокационные исследования могут успешно применяться на водных объектах в зимний период при учёте факторов, влияющих на их эффективность. Результаты эксперимента подчёркивают важность учёта внешних условий: толщины и состояния снежного и ледяного покровов, а также глубины водного объекта.

При зондировании с поверхности льда необходимо стремиться к минимизации влияния структурных нарушений во льду, вызывающих дополнительные отражения, перекрывающие полезную информацию, и рассеяние сигнала, уменьшающее глубину исследования. Снежный покров, в зависимости от используемой антенны и требуемой глубины, может использоваться как слой, снижающий влияние помех, либо расчищаться для увеличения глубинности георадиолокационного исследования.

2.3 Численное моделирование георадиолокационного зондирования при различных электрофизических свойствах сред

В результате аналитических решений и натурного моделирования получены результаты, установившие определенные закономерности влияния толщин снежного и ледяного покровов. Полученные данные ограничены числом фактических наблюдений и конкретными условиями формирования льда и накопления снега. Для учета множества параметров в системе водного объекта физические моделирования ограничены уникальными метеорологическими и гидродинамическими условиями одного сезона, региона и другими внешними факторами. Тем не менее, для обобщения результатов и обоснования оптимальных параметров георадарных исследований, применимых практически на всех водных объектах криолитозоны, может быть эффективно использовано численное моделирование георадарного сигнала.

Численное моделирование с помощью программного обеспечения gprMax предоставляет возможность интегрирования в модель широкого спектра параметров, включающих электрофизические свойства сред и их геометрические формы, влияющих на распространение и отражение георадарного сигнала (Warren, 2016). Основные преимущества численного моделирования заключаются в возможности варьировать толщины сред, диэлектрическую проницаемость, электропроводность и магнитную проницаемость. В свою очередь, через изменение данных свойств можно учесть изменения температуры, влажности, неоднородности во льду и донных отложениях. Формирование обширного массива данных с симуляцией различных сценариев дает статистически обоснованную основу для выбора оптимальных частот антенн, подходов для сбора данных и сезона работ с наиболее благоприятными условиями. К тому же, комплексирование численных результатов с натурными данными, позволяет прогнозировать ошибки интерпретации при аномальной зашумленности разрезов.

Исходя из результатов, полученных в ходе натурного моделирования, основной сценарий для модели заключается в изменении толщин льда и воды. Поскольку основным ограничивающим глубинность фактором в данной системе является электропроводность и толщина водного слоя, то при дальнейшем увеличении толщины льда и, соответственно, уменьшении толщины воды амплитуда отраженных сигналов предположительно должна увеличиваться. Для обоснования данного предположения необходимо произвести численное моделирование, выходная информация которого будет представлена в виде синтетической трассы с характерными для данных условий амплитудой, формой сигнала и временем прихода.

Проектирование модели начинается с тщательного определения геометрии исследуемого объекта. Для каждого материала задаются их электрофизические свойства и их расположение в моделируемом пространстве (Машков, 2021). Помимо физико-геологической модели в программе также указывается форма импульса, его частота и расположение источника с приемником. При формировании источника в данном исследовании использовался импульс Рикера с

заданными частотами 150 и 250 МГц, соответствующий георадару ОКО-3. Границные условия приняты в виде идеально согласованных слоев. Шаг дискретизации Δ выбран по условию, удовлетворяющему выражению (2.6) и равный 5 мм по всем осям (Судакова, 2018; Warren, 2016).

$$\Delta \leq \frac{\lambda_{\min}}{10}, \quad (2.6)$$

где λ_{\min} – минимальная длина волны в среде, определяемая отношением скорости света к произведению максимальной частоты антенны на относительную диэлектрическую проницаемость среды.

В качестве натурных данных использовались одиночные сигналы, полученные во фрагменте разреза с квазигоризонтальным дном. То есть, для моделирования использовались блоки правильной формы, сопоставимые с реальными средами (рис 2.10).

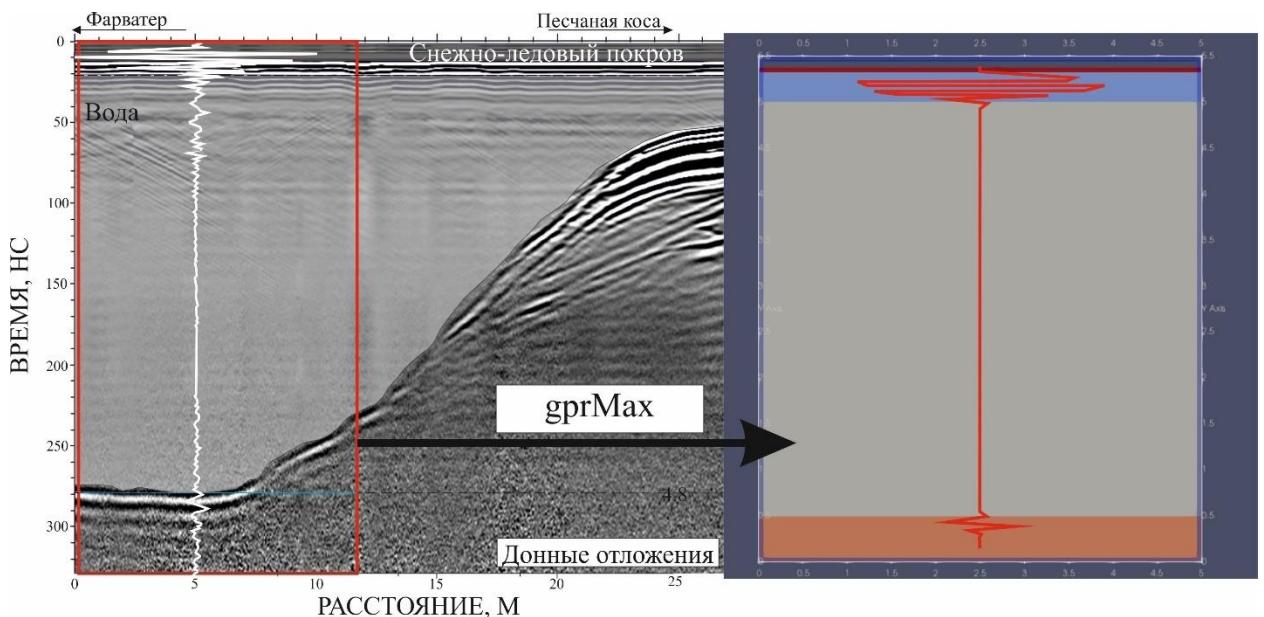


Рисунок 2.10 – Геометрический вид численной модели

Первым этапом выполнялась верификация заданных условий моделирования. Верификация осуществлялась сравнением синтетических A-scan трасс с реальными сигналами, зарегистрированными на мониторинговом полигоне (рис 2.11). Сравнительный анализ включал сравнение таких параметров, как время прихода сигнала от границ «лед – вода, вода – донные отложения», а также их форм и амплитудных характеристик.

ВЕРТИКАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ E_z [В/м]
АМПЛИТУДА ГЕОРАДАРНОГО СИГНАЛА [о.е.]

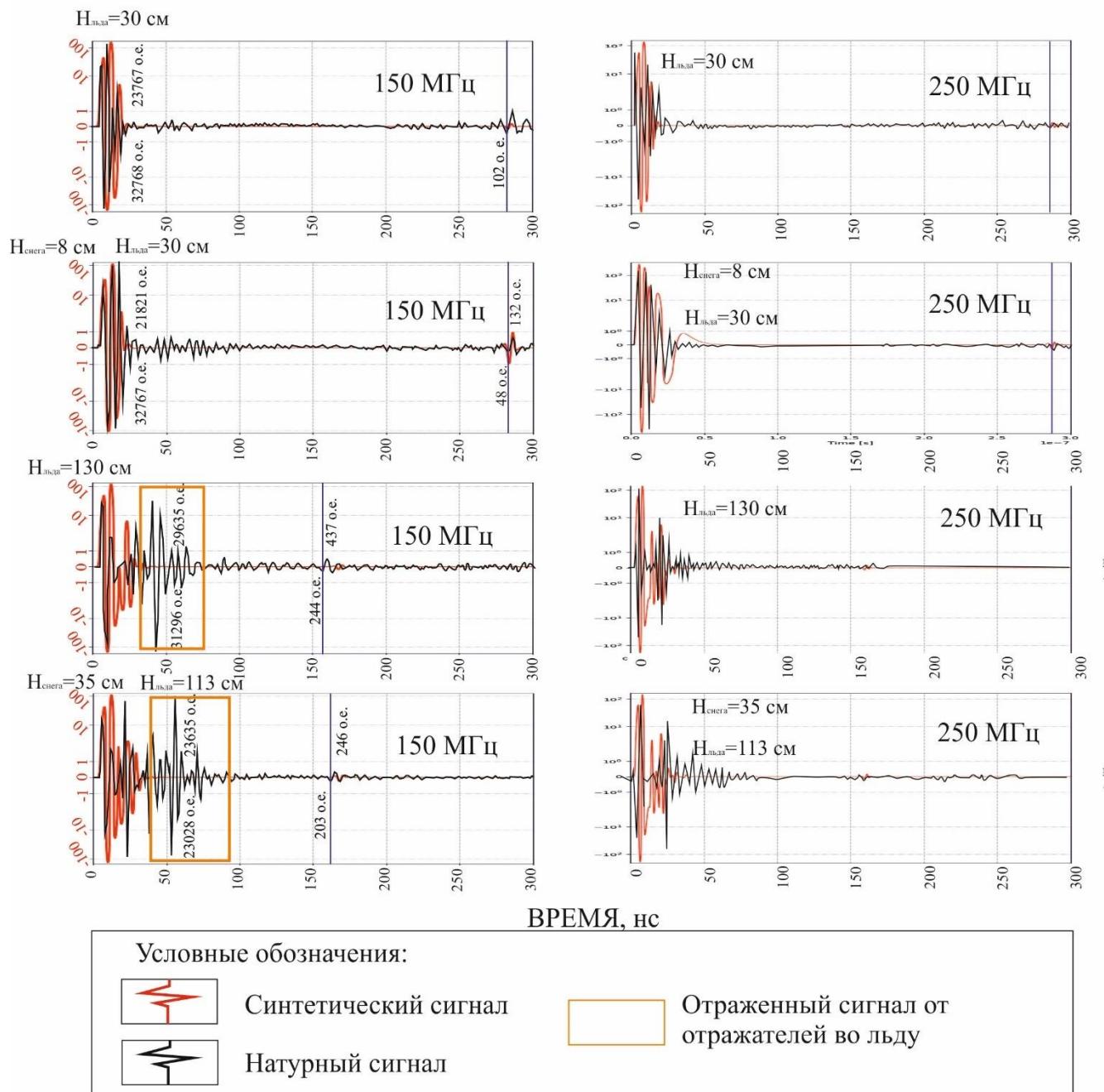


Рисунок 2.11 – Верификация построенной численной модели для антенн 150 и 250 МГц

В результатах численных моделей выявлена достаточно высокая качественная сходимость с полевыми данными, проявляющаяся в общей форме сигнала и изменениях пиков. Основным отличием являлось отсутствие в результатах численного моделирования помех (рис. 2.11), вызванных структурными нарушениями в ледяной толще. Однако форма основного сигнала

совпадает с пиками и основной динамикой амплитуды в средах и их границах. Такое совпадение качественных признаков может быть принято как достаточное условие для воспроизведения динамики форм сигналов и времени прихода с изменением мощности слоев.

Верификация воспроизводимых трасс распространения сигнала с помощью численного моделирования, позволила создать контролируемую среду для изолированного анализа влияния геометрических параметров льда и снега. После итеративного уточнения входных параметров и сеточных разрешений строится окончательный многофакторный симуляционный инструмент, который позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать изменения сигнала за пределами наблюденных данных.

Так, на рисунке 2.12 представлены результаты численного моделирования георадарных сигналов для антены с центральной частотой 150 МГц при различных толщинах ледяного покрова и соответствующих им глубинах водного слоя. Сценарий экстраполяции предполагал варьирование толщины льда от полного его отсутствия до 1,5 м, что позволило оценить влияние динамики накопления ледяного покрова на характеристики сигнала. Количественные значения амплитуды определены по симметрической логарифмической шкале (Warren, 2016). Данная шкала отличается от обычной линейной шкалы тем, что использует логарифмическое масштабирование, но при этом позволяет отображать как положительные, так и отрицательные значения без потери информации. Такой подход особенно полезен при анализе сигналов, где амплитуды могут отличаться на несколько порядков величины, например от сотен единиц зондирующего сигнала до десятков единиц слабых отражений и шумов.

Анализ амплитудных значений выявил сложное поведение отражённого сигнала с изменением толщины льда. При отсутствии льда амплитуда сигнала от границы дна составила примерно 63 условные единицы. При увеличении толщины льда до 0,15 м наблюдается резкое падение амплитуды до значения 46 единиц, что на треть ниже значения при зондировании без льда, свидетельствуя о присутствии негативного взаимодействии льда и водного слоя при данной толщине. При

дальнейшем утолщении ледяного покрова амплитуда начинает увеличиваться и максимальное значение 96 единиц достигается при толщине 1,5 м. Таким образом, амплитуда варьируется в диапазоне от 46 до 96 единиц в зависимости от толщины льда, что представляет двукратное изменение энергии отражённого сигнала.

Причины такого поведения амплитуды связаны с изменением глубины водного слоя, то есть по мере увеличения толщины льда его мощность вытесняет часть водного слоя, сокращая глубину воды. Поскольку вода является сильно поглощающей средой на частоте 150 МГц из-за её высокой электропроводности, сокращение мощности водного слоя приводит к меньшему затуханию электромагнитной энергии при распространении к границе дна и обратно, что естественным образом способствует увеличению амплитуды отражённого сигнала. Рост амплитуды отражённого сигнала на синтетических трассах при утолщении ледяного покрова согласуется с натурными данными.

Несмотря на увеличение амплитуды отражённого сигнала при утолщении ледяного покрова не является признаком улучшения качества зондирования. При толщинах льда, превышающих разрешающую способность антенны ($\lambda/4 \approx 0,28$ м для 150 МГц), происходит качественное изменение волнового взаимодействия, где большая часть спектра импульса начинает отражаться на границе лёд–вода, что усиливает потери и многократные переотражения. Одновременно с этим увеличивается количество неоднородностей во льду, которые приводят к рассеянию и рассредоточению энергии волны, что увеличивает уровень шума в приповерхностной части разреза.

В совокупности эти факторы приводят к тому, что при толщине льда выше 0,25 м потенциальный выигрыш в амплитуде сигнала от дна компенсируется качественным ухудшением результатов и снижением надёжности интерпретации. Поэтому для антенны с центральной частотой 150 МГц оптимальным следует считать диапазон толщин льда до 0,25 м, который обеспечивает приемлемую глубинность при сохранении достаточной разрешающей способности.

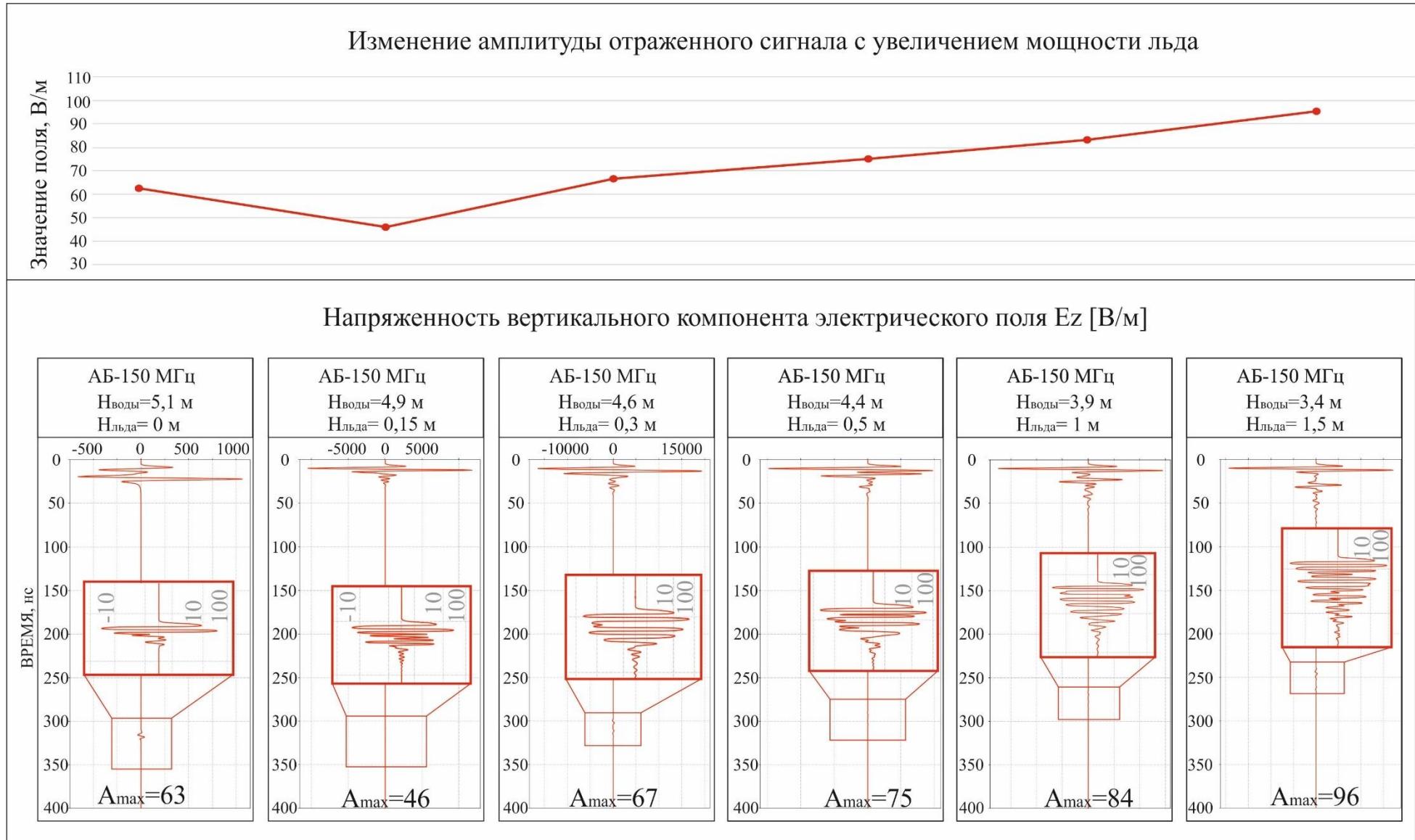


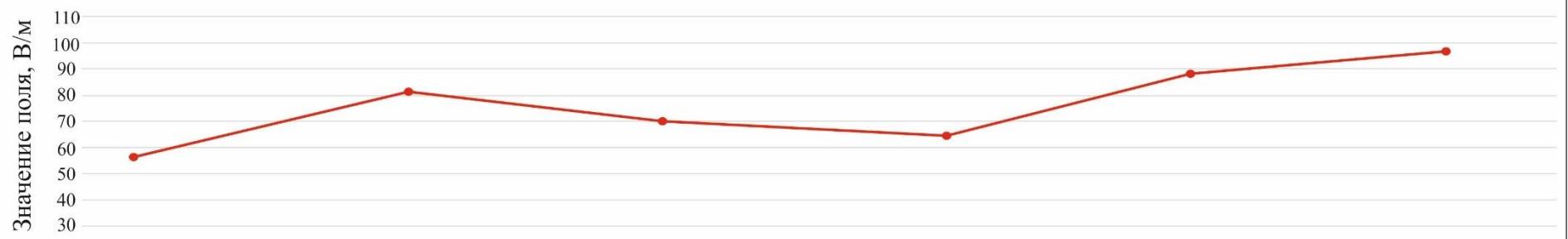
Рисунок 2.12 – Численные модели георадарного сигнала антенны АБ-150 МГц с экстраполяцией натурных данных

Синтетические сигналы для антенны с частотой 250 МГц представлены на рисунке 2.13. При тех же симуляциях, произведенных с частотой 150 МГц, можно наблюдать влияние толщины льда на амплитуду отраженного сигнала. Как и в первом случае, слой льда значительно модифицирует георадарный сигнал, изменения которого усиливаются с увеличением толщины льда.

Анализ амплитудной кривой для 250 МГц выявляет несколько иное поведение амплитуды по сравнению с частотой 150 МГц. При отсутствии льда амплитуда сигнала от границы дна составляет примерно 57 условных единиц, что на 10 процентов ниже, чем для 150 МГц. При увеличении толщины льда до 0,15 м амплитуда резко возрастает до 81 единицы, что в отличие от кривой 150 МГц демонстрирует заметный рост амплитуды вместо падения. При дальнейшем увеличении толщины льда до 0,3 м амплитуда снижается до 70 единиц при этом разрешающая способность данной антенны АБ-250 МГц во льду составляет $\lambda/4 \approx 0,16$ м. При значениях мощности льда 0,5 м амплитуда падает до 65 единиц, что представляет наименьшее значение из всего диапазона последующих симуляций.

На основе значений амплитуд на границе дна для АБ - 250 МГц рекомендуемый диапазон толщин ледяного покрова существенно ограничен по сравнению с 150 МГц и составляет 0,1–0,2 м, при котором амплитуда достигает оптимального значения. Однако критическое ограничение практического применения состоит в том, что оптимальная толщина ледяного покрова преимущественно приходится на начальную стадию сезонного ледостава, характеризуемую нестабильной структурой и высокой степенью потенциального риска при проведении полевых работ на поверхности льда.

Изменение амплитуды отраженного сигнала с увеличением мощности льда



Напряженность вертикального компонента электрического поля Ez [В/м]

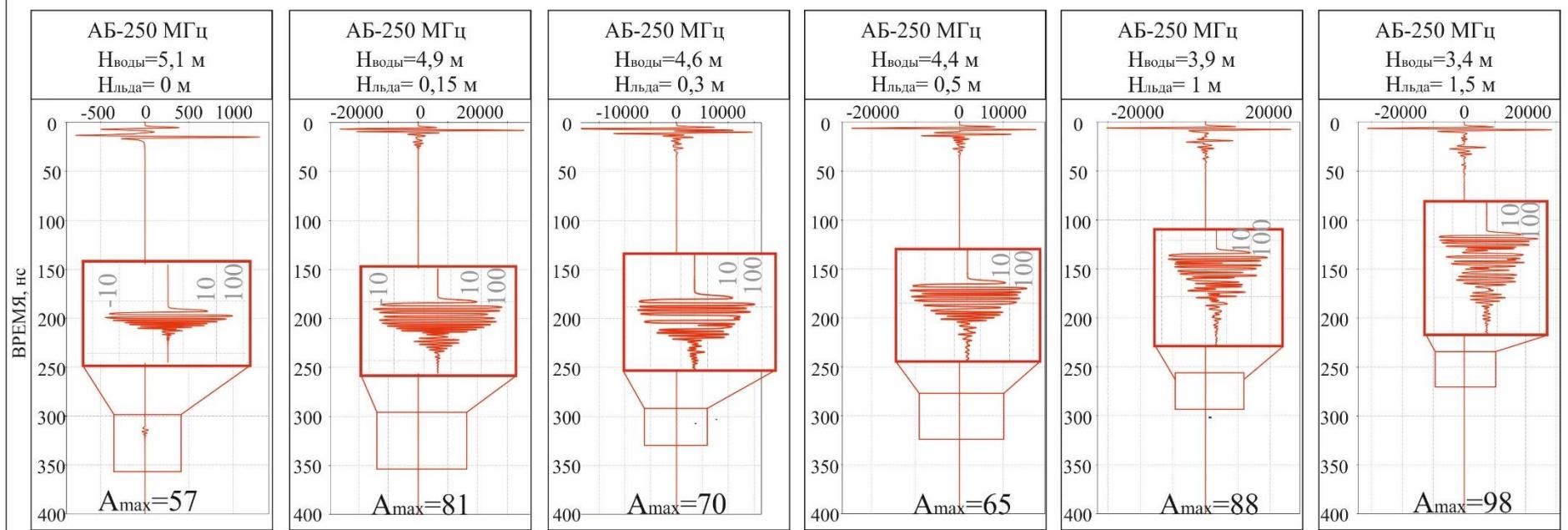


Рисунок 2.13 – Численные модели георадарного сигнала антенны АБ-250 МГц с экстраполяцией натурных данных

Сравнение характеристик обеих антенн приводит к выводу о приоритете использования антенны АБ-150 МГц для исследований донных отложений пресных водных объектов в условиях наличия сезонно-мерзлого покрова.

Рекомендуемый диапазон толщин ледяного покрова для 150 МГц соответствует стадии ледостава, когда ледяной покров обладает достаточной механической прочностью для безопасного проведения работ и одновременно обеспечивает высокое качество данных. В практическом отношении диапазон 0,25 – 0,3 м соответствует типичным условиям ледообразования в водных объектах криолитозоны в период с середины ноября до первой половины декабря, когда лёд обладая достаточной несущей способностью не разился в толстый ледяной покров, затрудняющий проникновение электромагнитного сигнала и снижающий надёжность интерпретации.

На рисунке 2.14 представлены характерные волновые картины, полученные при георадиолокационном зондировании с поверхности чистого пресного льда толщиной от 0,3 м до 1,3 м с использованием антенны АБ-150 МГц, а также результаты В-сканирования при мощности льда 0,25 м и 1,5 м. Верхний график показывает изменение амплитуды отражённого сигнала на границе воды и донных отложений с изменением мощности ледяного покрова, где красная кривая представляет натурные данные полевых измерений, а зелёная кривая показывает результаты численного моделирования. Качественное согласие между натуральными и модельными данными демонстрирует адекватность применённого численного подхода для описания физических процессов, происходящих при распространении электромагнитных волн в условиях ледяного покрова над водным слоем.

Слева направо представлены последовательные стадии сезонного ледостава, иллюстрируя эволюцию волновых картин по ходу зимнего периода. На ранней стадии ледостава в октябре, при толщине ледяного слоя около 0,25 м, ледяной слой остаётся структурно однородным, не имея значительных внутренних границ раздела. В связи с чем, в численной модели помехи в ледяном не учитывались. По мере развития ледостава на натурных данных в период с ноября по декабрь, когда толщина ледяного покрова увеличивается до диапазона 0,25 – 0,6 м, волновые

картины демонстрируют качественное изменение характера в виде систематической слоистости. При этом сигнал от дна остаётся чётким и хорошо разрешённым, что указывает на высокое качество полученных данных для последующей интерпретации геологической структуры донных отложений.

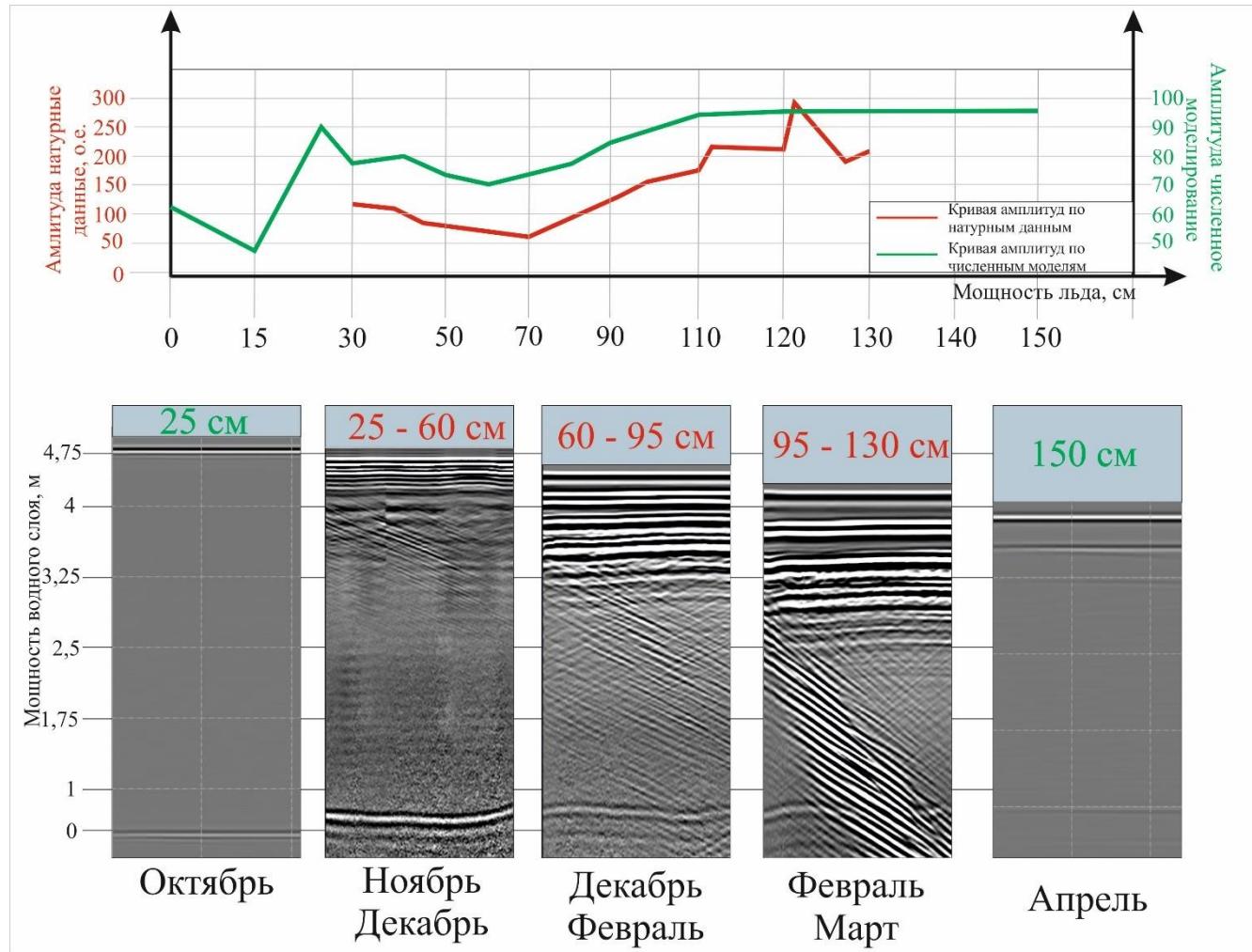


Рисунок 2.14 Характерные волновые картины антенны АБ-150 МГц для разного периода ледостава

При дальнейшем утолщении льда в период с декабря по февраль, когда толщина ледяного покрова увеличивается до 0,6–0,95 м, плотность и регулярность слоистости в волновых картинах заметно возрастают. Волновые картины демонстрируют прогрессирующее увеличение числа отражающих горизонтов в составе ледяного слоя, что свидетельствует об усложнении его внутренней структуры с развитием более тонких и многочисленных слоев с контрастирующими диэлектрическими свойствами и увеличением трещин. Однако несмотря на увеличение внутренней сложности волновой картины,

основная структура слоистости остаётся чёткой и интерпретируемой, позволяя выделять отдельные отражающие горизонты и отслеживать их пространственное распределение. На поздней стадии ледостава в период февраля-марта, при толщинах ледяного покрова 0,95–1,3 м, структура льда становится максимально развитой, содержит множество внутренних границ различной плотности и увеличение размеров трещин. Радарограммы в этот период показывают интенсивный спектр отражений, отражающих, как стратификацию ледяного покрова, так и различные помехи, находящиеся в разной степени удаленности. Несмотря на это отражение от дна остается видимым и часть границы может быть уверенно выделено из общей картины множественных отражений.

К концу зимнего сезона в апреле, когда толщина льда достигает своего максимума (около 150 см), волновые картины демонстрируют, что электромагнитный сигнал всё ещё способен проходить через толстый ледяной слой и отражаться от границы вода – донные отложения, хотя амплитуда отражённого сигнала и испытывает заметное ослабление вследствие отражения и затухания волны в массиве льда и воды.

Выводы

Анализ результатов аналитических решений, натурного эксперимента и численного моделирования показал, как наблюдаемые характеристики георадарного сигнала изменялись с изменением толщины ключевых слоев в системе водного объекта. Эти изменения тесно связаны с сезонными вариациями накопления снега, нарастания льда и снижением уровня воды. Рассматривая, полученные результаты, однозначно можно установить диапазоны толщины слоев, при которых определенная антenna обладает достаточной эффективностью для решения прикладных задач. Так, на основе экспериментальных наблюдений были определены условия, при которых достигается баланс между глубинностью и разрешением для частот 150 и 250 МГц. Для всех частот основным ограничивающим глубинность фактором является водный слой. Снижение уровня воды приводит к закономерному увеличению амплитуд отраженных от дна сигналов. Однако вместе с этим увеличиваются амплитуды помех. Наличие снега в данных условиях, позволило сократить негативное влияние шумов.

Наиболее благоприятным периодом для проектирования георадарных исследований установлен этап, при котором лед уже сформирован в стабильную платформу, безопасную для нахождения на ней техники и человека, а ее толщина при этом варьируется от 0,2 до 0,3 м. Предлагаемый подход заключается в применении частоты 150 МГц для глубинных зондирований. Как показали исследования, информативность данной антенны сохраняется при глубинах более чем 5 м. К тому же, в случае, когда длина волны больше слоя льда в четыре раза, влияние отражения минимально. Если рассматривать зондирующий сигнал в диапазоне частот от 75 МГц до 225 МГц, то для самой низкой частоты 75 МГц слой льда с мощностью меньше 0,56 м оказывается меньше разрешающей способности. Для детальных исследований донных отложений на глубине в пределах 3-4 м, оптимальным решением предлагается антenna 250 МГц. Данная частота сохраняет баланс между глубинностью и разрешающей способностью при тех же толщинах льда и снега (0,05–0,25 м). АБ-400 МГц может быть использована для определения

толщин и внутренней структуры льда, а также донных отложений, расположенных не глубже 2 м.

По результатам натурного и численного моделирования установлено, что при максимальной толщине льда и снижении уровня воды, исследование донных отложений и локальных объектов под водой в глубоководных объектах может быть успешным с использованием антенных блоков с центральными частотами 150 МГц и 250 МГц. При этом верхняя часть разреза будет подвержена сильному влиянию шумов и помех, которые усложняют однозначную интерпретацию на глубинах до 2 м и более.

Таким образом на основе комплексных исследований, проведенных в рамках описанного исследования, установлено, что при георадиолокационном зондировании в диапазоне частот с 75 МГц до 225 МГц с поверхности пресного льда толщиной до 0,25 м, эффективность не снижается по сравнению с зондированием с открытой воды, что подтверждает возможность его использования при исследовании донных отложений пресноводных водоемов криолитозоны.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТЕННОЙ УСТАНОВКИ, СНИЖАЮЩЕЙ УРОВЕНЬ ПОМЕХ ПРИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СО ЛЬДА

3.1 Обоснование возможности сокращения уровня шумов, вызванных структурными нарушениями льда

В результате эксперимента на реке Лене, описанного в предыдущей главе, установлена определенная зависимость амплитуд отраженных сигналов от мощности сред: воздуха, снега, льда и воды. По качественным признакам, однозначно установлено снижение влияния сигнала помех при наличии снежного покрова, создающего дополнительное расстояние между антенным блоком и поверхностью льда. Также в ходе экспериментальных исследований были получены результаты сканирования с расположенным на высоте антенным блоком. На каждом профиле на всех этапах исследования использовались три антенны, положение которых варьировалось, начиная с поверхности льда и снега до высот 0,8 м. Однако после обработки данных, основные выводы сделаны по результатам, полученными антеннами АБ-150 МГц и АБ-250 МГц на высотах 0,2 и 0,4 м.

Устройство и технология применения антенной установки для снижения уровня помех. Использованная на экспериментальном полигоне антенная установка, представляет собой конструкцию для антенных блоков, состоящую из радиопрозрачных материалов. (рис. 3.1) (Христофоров, 2024). Платформа, на которую крепится георадар, фиксируется на разных высотах от поверхности за счет четырех стоек с отверстиями для крепежа. Шаг подъема составляет 0,2 м. Необходимые параметры, которыми обладает данное устройство – это радиопрозрачность материалов, возможность крепления антенн разного типа и размеров, а также мобильность и транспортабельность.

Основная идея, заложенная в данную установку, заключается в имитации снежного покрова на участках с открытым льдом или недостаточно толстым снежным покровом (Горохов, 2023; Горохов, 2023; Христофоров, 2022), то есть

устройство позволяет адаптировать параметры съемки в зависимости от условий обследуемого участка.

Кроме того, в отличие от традиционного георадиолокационного зондирования, основанного на непосредственном контакте с границей поверхности снежного или ледяного покрова, созданная устройством дополнительная воздушная среда позволяет улучшить качество получаемой информации в соотношении сигнал/шум.

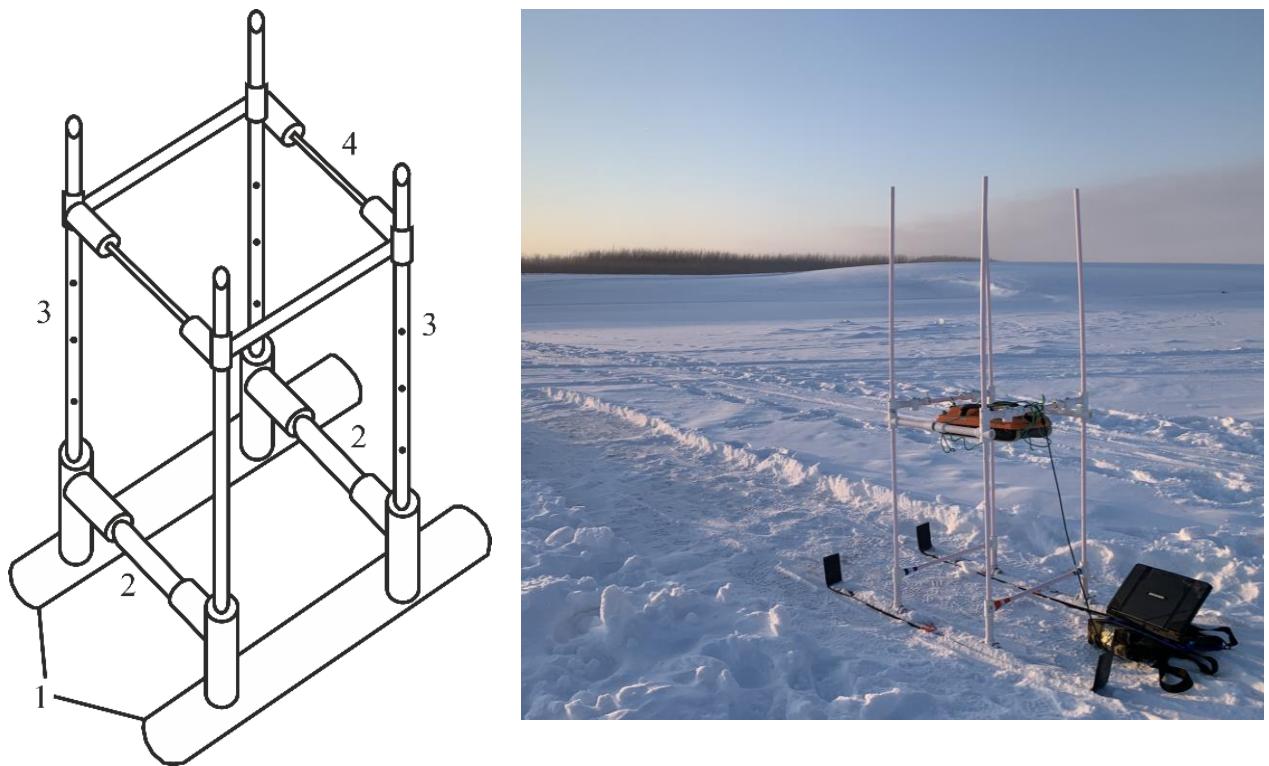


Рисунок 3.1 – Устройство для поднятия антенного блока; 1 – лыжи; 2 – нижние неподвижные балки; 3 – вертикальные стойки; 4 – поперечные балки

Физическое обоснование снижения помех связано с изменением расстояния между георадарным блоком и поверхностью льда. Поскольку зондирование в контакте с чистым льдом, обладающим структурными нарушениями, приводит к тому, что отражения от неоднородностей во льду по типу газовых пузырей, трещин, слоистости и т. п. накладываются на полезный сигнал от дна. Подъем антенн на высоту h , обеспечивает дополнительное ослабление сигналов за счет отражений на границе «воздух – лед», что действует как естественный фильтр высокочастотных компонент (Христофоров, 2022; Христофоров, 2021; Markovaara-Koivisto, 2014). Это уменьшает влияние вторичных отражений от структурных неоднородностей,

находящихся в толще льда, которые при обычном расположении антенны распространяются вдоль ледяного слоя с эффектом волновода и создают помехи при интерпретации. Таким образом, часть энергии сигнала, распространяющегося по льду и возвращающегося к приемнику без проникновения в водную среду, сокращается (рис.3.2). Это снижает уровень помех, вызванных отражателями во льду, и повышает соотношение сигнал/шум при регистрации отражений от дна.

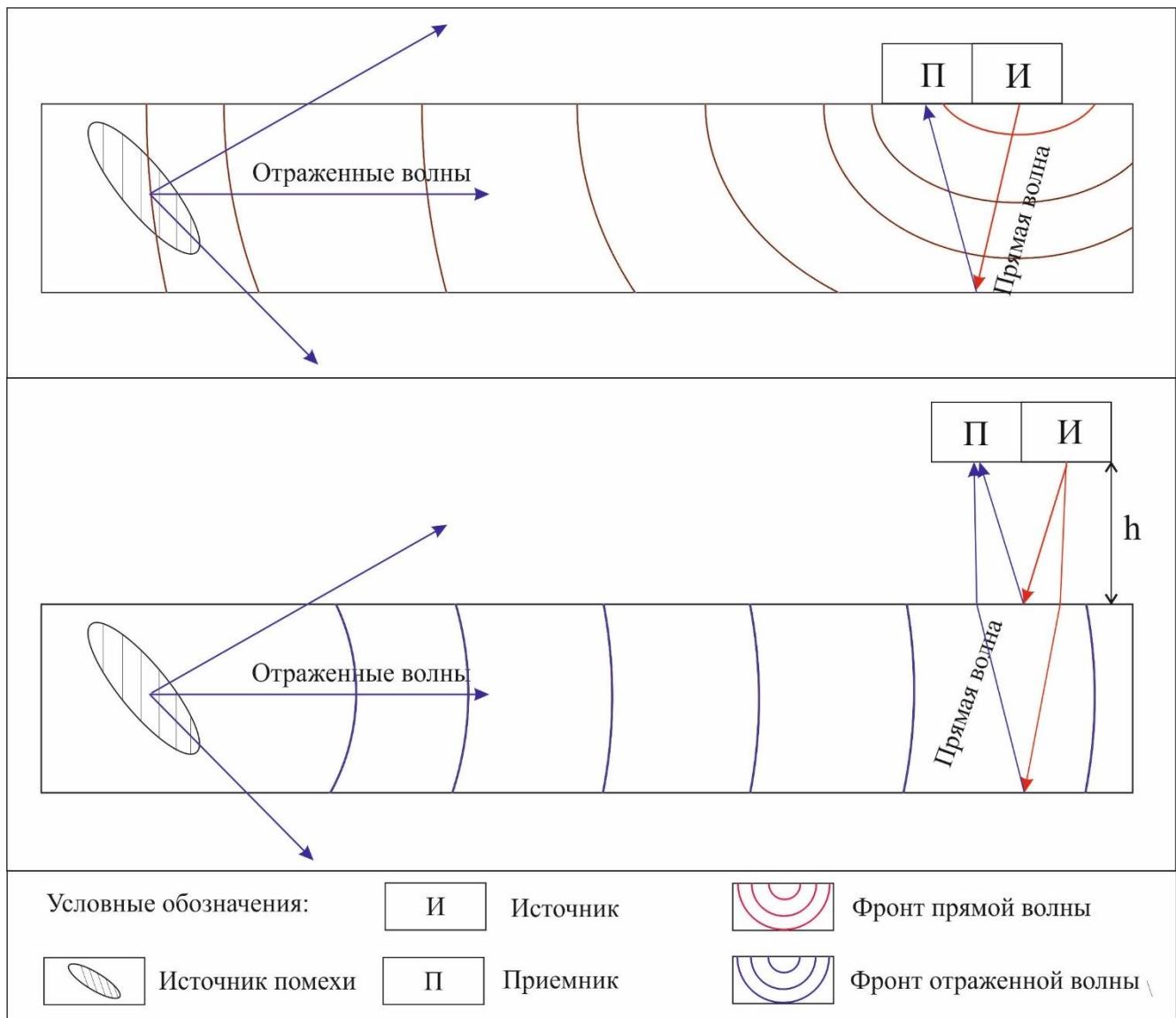


Рисунок 3.2 – Распространение электромагнитной волны через ледяной покров с высоты

Важным эффектом подъема антенны является уменьшение угла преломления и связанное с этим сужение диаграммы направленности. При увеличении отношения диэлектрических проницаемостей сред излучение концентрируется в более узком секторе. Это явление было описано М. И. Финкельштейном с

применением принципа излучения Вавилова-Черенкова и законов Снеллиуса, где показана угловая зависимость амплитуды поля при условии, что источник находится на высоте h . Амплитуда волны в диапазоне углов $180 \leq \alpha \leq 270 - \arcsin(\frac{1}{\sqrt{3.2}})$ и $\leq 270 + \arcsin(\frac{1}{\sqrt{3.2}}) \leq \alpha \leq 360$ для льда определяется выражением 3.1 (Финкельштейн, 1994; Финкельштейн, 1984):

$$E(\alpha) = \frac{2\sqrt{\varepsilon_2} * \sin(\alpha)}{\sqrt{\varepsilon_2 - 1}} e^{(-\frac{2\pi}{\lambda} H \sqrt{\varepsilon_2 * \cos^2(\alpha) - 1})}, \quad (3.1)$$

где ε_2 – диэлектрическая проницаемость среды проникновения, α – угол падения луча, H – расстояния до источника, λ – длина волны.

Анализ данной зависимости показывает, что при увеличении отношения H/λ амплитуда поля в верхнем слое возрастает, а в нижнем слое быстро падает за пределами сектора, равного $\pm \arcsin(\frac{1}{\sqrt{3.2}}) \sim \pm 18^\circ$. Такое ограничение углового раскрыва обеспечивает сужение диаграммы направленности, что приводит к подавлению боковых помех и одновременному повышению горизонтальной разрешающей способности. Благодаря этому становится возможным более детальное изучение донного рельефа, отложений и локальных объектов, включая протяженные инженерные сооружения.

3.2 Обоснование оптимальных высот для антенн с частотами 150 МГц, 250 МГц

Основная идея комплексного использования антенн георадара с разработанной установкой, заключается в определении оптимального положения антенны, при котором будет достигнут максимальный эффект фильтрации с сохранением результативности и информативности георадарной записи. Взяв за основу значения диэлектрической проницаемости для сухого снега (1, 2) и воздуха (1), то подъем антенны над чистым льдом должен привести к снижению уровня помех. Таким образом, одной из задач натурного эксперимента на полигоне реки Лены являлось определение оптимальных положений антенных блоков на разных

частотах, при которых будет наблюдаться оптимальное соотношение значений амплитуды помехи и полезного сигнала на контрольной границе.

Всего в течение зимнего периода получено 216 георадарных профилей с использованием антенной установки. Методика комплексирования георадара с антенной установкой заключалась в расположении антенного блока на не экранирующую конструкцию с лыжами. Высота для каждой частоты подбиралась эмпирическим путем, исходя из качества регистрируемых данных и конструктивных решений. Так, в ходе эксперимента для антенны АБ-150 МГц использовались высоты 0,2 м и 0,4 м. Антenna АБ-250 МГц использовалась на высотах 0,2, 0,4 и 0,6 м. АБ-400 достигал уровня 0,8 м. Дальнейший анализ включает данные, полученные антеннами АБ-150 и АБ-250 на высотах 0,2 м и 0,4 м.

В результате качественной и количественной оценки зарегистрированных данных, на примере представленном на рисунке 3.3, можно определить характер изменения амплитуды помехи и полезного сигнала при подъеме антенны. Первичная обработка радарограмм заключалась в использовании инструментов усиления сигнала по экспоненте и подбора шкалы контраста в диапазоне от 850 до 950 единиц. Для сопоставления амплитуд помехи и полезного сигнала использована функция выравнивания и все значения выбирались по пикету (ПК_3). Амплитуда помехи бралась как максимальное значение по модулю на шкале, соответствующей пикету 3. Амплитуда полезного сигнала соответствует значению первого вступления. Качественная оценка установила меньшую степень влияния помех на профиле, выполненных с поверхности снежного покрова. Следует отметить, что трещины располагалась за пределами полигона и находилась на расстоянии ~10 м.

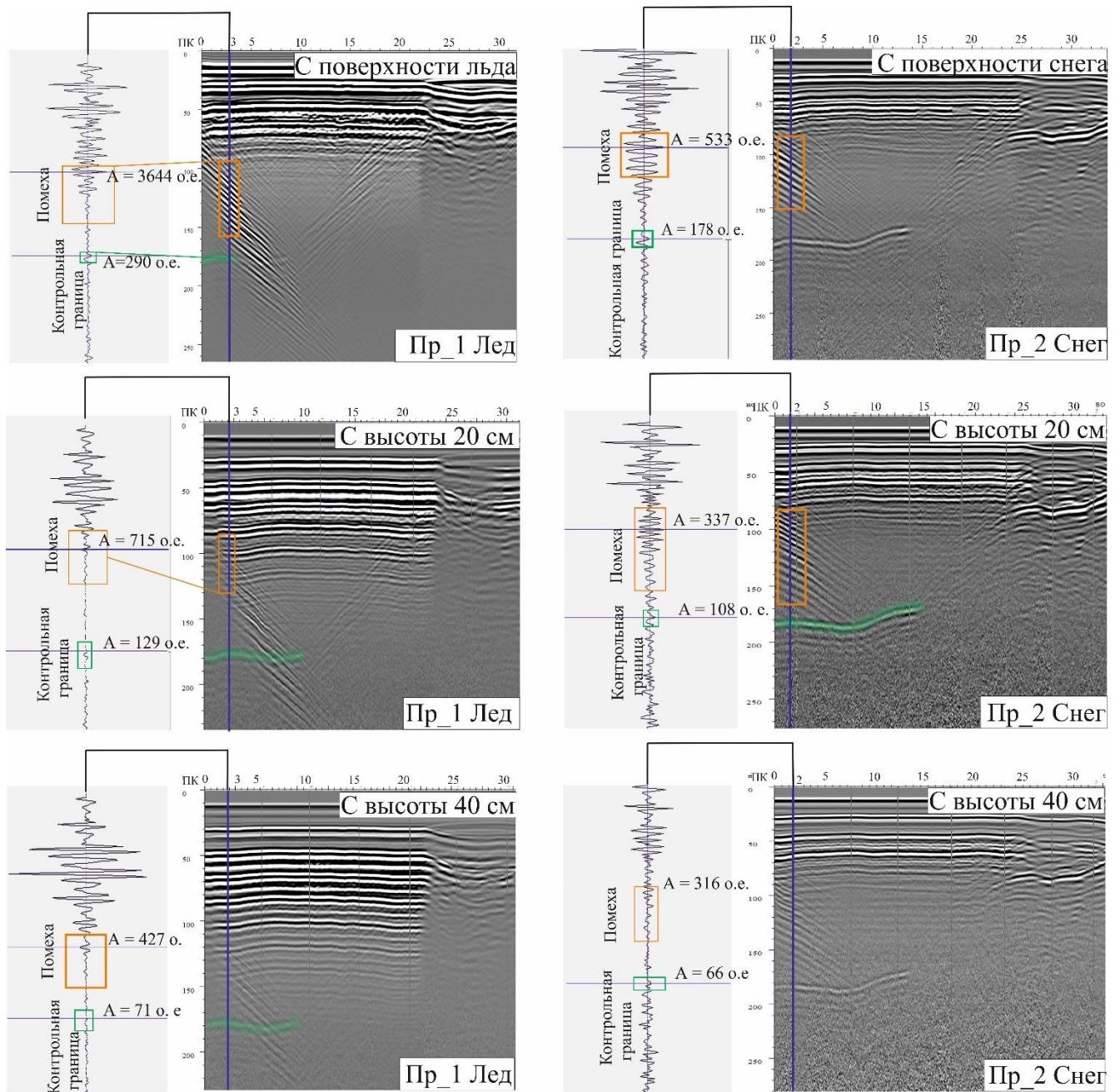


Рисунок 3.3 – Амплитуды сигналов помех на радарограммах, полученных по двум профилям антенной АБ-150 МГц на разных высотах

В таблице 3.1 представлены значения амплитуд помехи и сигнала с центральной частотой 150 МГц при разных условиях зондирования. Представленный массив данных соответствует периоду с 27.01.22 по 15.04.22 и включает значения мощности льда по двум профилям. Ключевым параметром для определения эффективности определенной высоты антенны является соотношение амплитуды сигнала к амплитуде помехи.

Таблица 3.1 Амплитудные характеристики помехи и полезного сигнала при разных условиях зондирования

Дата	Профиль	Мощность льда	А помехи на разных высотах, см			А сигнала на разных высотах, см			Сигнал/помеха		
			0	20	40	0	20	40	0	20	40
27.01	Со льда	93	1632	450	190	145	93	38	0,088848	0,206667	0,2
	Со снега	75	552	282	165	132	92	38	0,23913	0,326241	0,230303
4.02	Со льда	100	1780	838	521	151	108	76	0,084831	0,128878	0,145873
	Со снега	85	560	388	338	140	74	64	0,25	0,190722	0,189349
24.02	Со льда	110	907	372	211	162	113	75	0,178611	0,303763	0,35545
	Со снега	102	490	270	186	147	105	92	0,3	0,388889	0,494624
5.03	Со льда	115	4836	543	421	234	145	123	0,048387	0,267035	0,292162
	Со снега	107	598	375	269	218	125	87	0,364548	0,333333	0,32342
10.03	Со льда	119	2457	443	437	220	153	131	0,08954	0,345372	0,299771
	Со снега	109	613	555	362	219	135	83	0,357259	0,243243	0,229282
17.03	Со льда	121	3644	715	427	290	129	71	0,079583	0,18042	0,166276
	Со снега	110	533	337	316	178	108	66	0,333959	0,320475	0,208861
8.04	Со льда	126	2023	759	384	193	90	69	0,095403	0,118577	0,179688
	Со снега	112	782	740	442	217	120	116	0,277494	0,162162	0,262443
15.04	Со льда	130	1333	992	592	209	204	92	0,156789	0,205645	0,155405
	Со снега	113	800	424	398	160	130	87	0,2	0,306604	0,218593

Исходя из таблицы 3.1, можно отметить отсутствие линейной зависимости между мощностью льда и амплитудой помехи, вызванной трещиной во льду. В начале зимнего периода до 27.01.22 года при значениях мощности льда до 0,75 м, на радарограммах отсутствовал выраженный контраст между трещиной и окружающим льдом. Однако по мере дальнейшего нарастания мощности льда, амплитуда помехи принимает различные значения в диапазоне от 490 о.е. до 4836 о.е. при этом нет однозначной связи с датой измерения. Данное явление, вероятно, связано с изменяющимися свойствами самой трещины в разные периоды зимы, зависящие в большей степени от ее заполнения. Заполнение трещин вносит существенные изменения в электрофизические характеристики и по-разному влияет на отражение сигнала (Markovaara-Koivisto, 2014; Федоров, 2019). Таким образом, фиксируемая во времени изменчивость отражений от одной и той же трещины подтверждает, что на характер помехи существенное влияние оказывает не только её наличие как таковое, но и текущее состояние заполнителя, а также сезонная динамика ледяного массива.

На рисунках 3.4 и 3.5 представлены графики, построенные по значениям соотношений амплитуды полезного сигнала к амплитуде помехи. По графикам можно установить, что с повышением толщины льда отношение амплитуд незначительно уменьшается. Построенная зависимость амплитудных характеристик отраженных сигналов показала, что максимальное влияние трещины во льду, начинается с мощности льда более 1 метра. Сравнивая исходные данные, полученные в контакте с поверхностями, можно отметить более чем двукратное превосходство значений помех на данных, полученных без снежного покрова. При симуляции его наличия, путем поднятия антенны, наблюдается значительное снижение амплитуд. С учетом толщины самого снежного покрова, в среднем 0,25 м и с увеличением высоты над снегом до 0,4 м, получаем суммарно 0,6–0,65 м, при которых антенна все еще способна регистрировать полезный сигнал, но с потерями контраста на границе донных отложений.

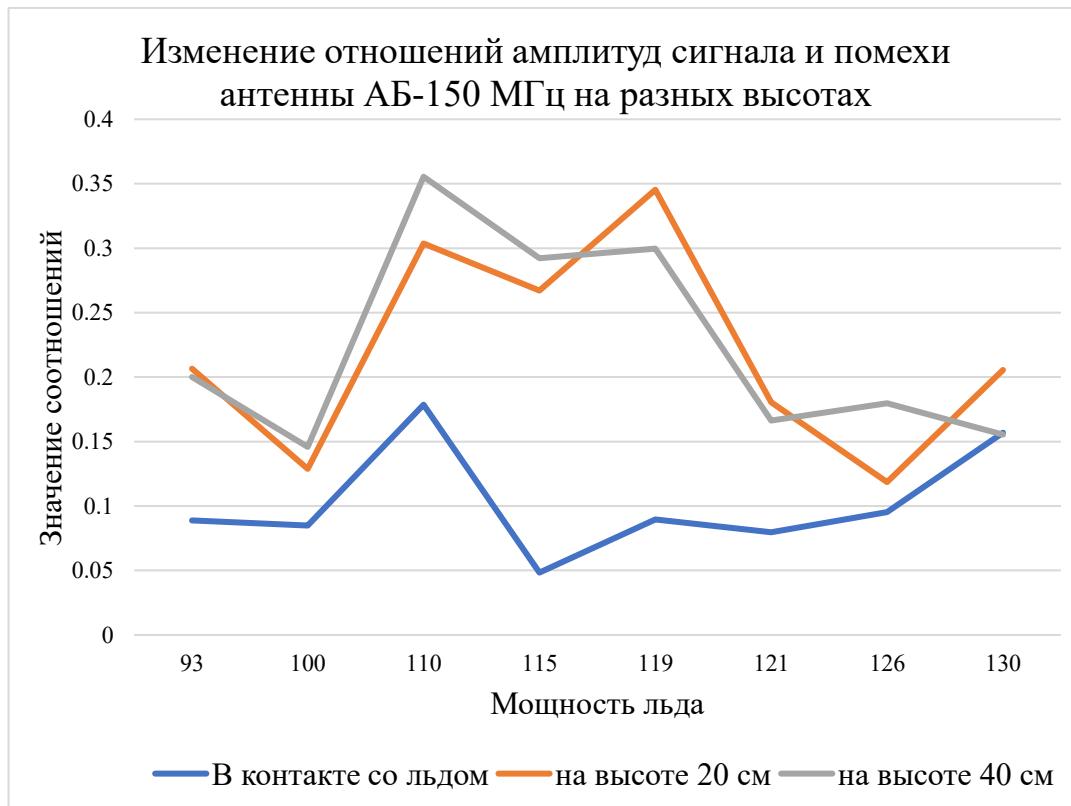


Рисунок 3.4 – Изменение соотношения амплитуд в зависимости от мощности льда и высоты антенны на профиле с чистым льдом

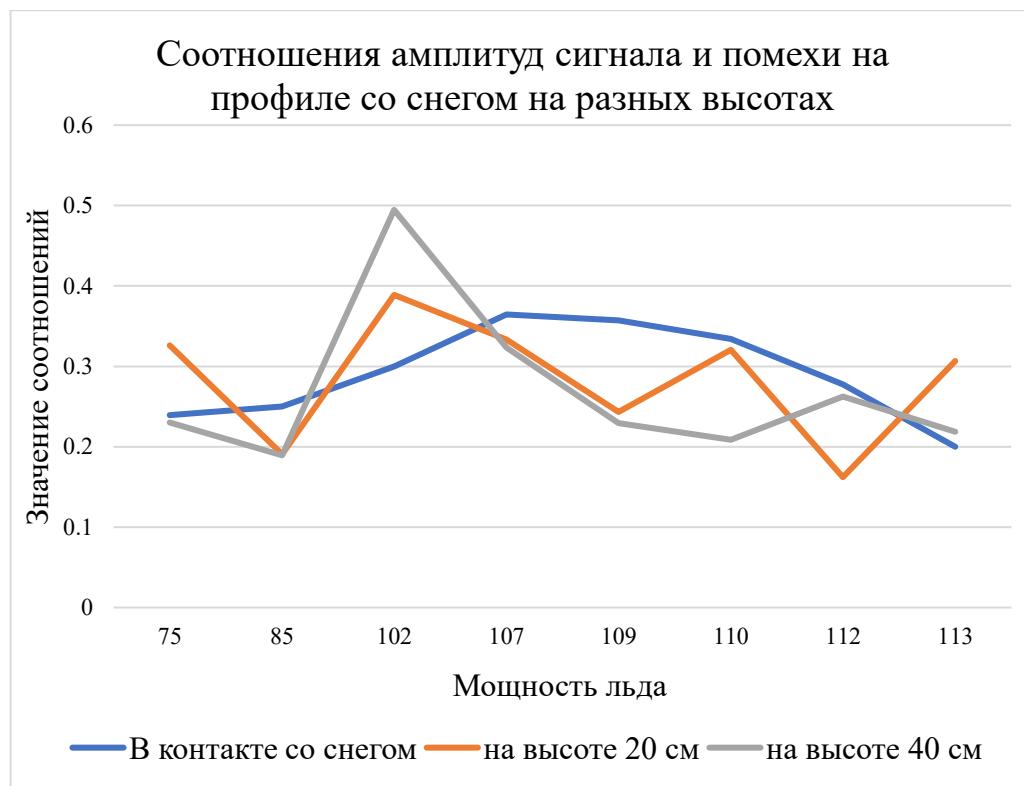


Рисунок 3.5 – Изменение соотношения амплитуд в зависимости от мощности льда и высоты антенны на профиле со снежным покровом

В результате анализа графиков можно отметить, что различия в условиях установки антенн над поверхностью льда и снежного покрова оказывают заметное влияние на соотношение амплитуд сигнала и помехи. На чистом льду при непосредственном контакте антенн значения остаются минимальными. Подъём антенн позволяет улучшить качество регистрации, при этом наиболее благоприятные значения достигаются на высоте 0,2–0,4 м, когда с одной стороны уменьшается вклад поверхностных шумов, а с другой – сохраняется достаточный уровень полезного сигнала. Однако при дальнейшем увеличении мощности льда прослеживается тенденция к снижению эффективности, особенно при значительном зазоре в 0,4 м, что свидетельствует о потере устойчивости сигнала.

В условиях снежного покрова картина оказывается более благоприятной. Снег выполняет роль естественного переходного слоя, благодаря чему даже при контакте соотношение сигнал/помеха остаётся выше, чем на чистом льду, а кривая отличается большей сглаженностью и отсутствием резких провалов. Подъём антенн в этих условиях также приводит к росту значений и формированию локальных максимумов, однако сопровождается заметной изменчивостью, связанной, вероятно, с неоднородностью структуры снега и её влиянием на распространение радиоволн.

Таким образом, однозначно установлено снижение влияния сигнала помехи при увеличении расстояния между антенным блоком и поверхностью исследования. С учетом результатов, полученных для антенны 150 МГц, рекомендовано использование обоих положений по высоте, обоснование для которых сводится к условиям зондирования. При значительных перекрытиях полезной информации для неглубоких водных объектов оптимальным решением будет поднятие антennы на 0,4 м для максимального снижения уровня помех. При решении задач, связанных с глубинными исследованиями, уровень в 0,2 м предоставит баланс между сохранением амплитуды полезного сигнала и сокращением сигнала помех.

Анализ данных, полученных другими антеннами, показал, что значительное влияние трещины начало проявляться начиная с 10.03.2022 г. В данный период

мощность льда составляла более 1 м. В таблице 3.2 представлены изменения амплитуд помех, для антенны с частотой 250 МГц.

Таблица 3.2. Изменение амплитуды помехи с увеличением высоты, АБ-250

Дата	10.03.22		17.03.22		08.04.22		15.04.22	
Высота антенны \ Условия на профиле	Со льда	Со снега						
А с поверхности	73	36	72	38	92	43	354	109
А, с высоты 0.2 м	11	9	15	17	21	12	97	73
А, с высоты 0.4 м	6	7	5	3	12	4	61	38
А, с высоты 0.6 м	-	-	2	-	5	3	21	20

Зашумленность радарограмм, полученных антенной с центральной частотой 250 МГц, оказалась критичной и значительной только при больших толщинах льда. В разрезах, полученных до увеличения мощности льда до толщины более 1 м, степень зашумленности, оставалась умеренной и не вносила существенных искажений и перекрытий полезного сигнала. Однако, начиная с 08.04.22, область перекрытия на обоих профилях достигло максимального эффекта и распространялась до 400 нс по временной шкале. Это означает, что сигналы, отраженные от границы дна реки, не были визуально зафиксированы. Поднятие антенны позволило, получить информацию о рельефе дна при высотах начиная от 0,4 м.

Для антенны 400 МГц, глубинность исследования ограничена высоким затуханием сигнала, в связи с чем влияние помех не было проанализировано. Однако антенна АБ-400 МГц может быть применена для ледомерных работ. Вертикальная разрешающая способность данной антенны во льду составляет ~0,1 м и способна зарегистрировать строение и структуру ледяного массива. Для оценки эффективности применения антенной установки при определения толщины ледяного покрова методом георадиолокации проведен анализ результатов, полученных двумя антеннами АБ-250 МГц и АБ-400 МГц при различных условиях съемки. Каждая антенна включает массив данных, собранных по двум профилям:

ПР_1 – профиль с поверхности чистого льда и ПР_2 – профиль с сохранением естественного накопления снежного покрова. Измерения дополнительно выполнены с использованием антенной установки, на высотах 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 м. Увеличение высоты положения антенного блока проводилось для оценки влияния близости антенны к поверхности исследуемых сред на точность определения верхней границы. В таблице 3.3 представлены, полученные значения при различных условиях съемки в течение всего мониторингового периода. Дополнительно посчитаны средние относительные ошибки для каждого положения антенны. Эталонными значениями приняты данные бурения лунок.

Для определения толщины льда выставлена диэлектрическая проницаемость 3,2, при этом пикирование выполнено по первым вступлениям сигнала. В результате, обе антенны продемонстрировали систематическое занижение толщины льда в среднем на ~0,05 м на начальных этапах ледостава. Антenna АБ-250 МГц при рассмотрении ошибок, полученных по профилю 2 (ПР_2) чаще всего завышает фактическую мощность льда при поднятии антенны. Значения, полученные антенной АБ-400 МГц на ПР_2 оказались более точными на высотах более 0,4 м, за счет регистрации и интерпретации верхней границы льда.

В итоге эксперимента установлено, что увеличение высоты для антенн 150 МГц и 250 МГц существенно снизило влияние трещины. Наилучшее соотношение снижения амплитуд помехи и сохранения амплитуды полезного сигнала для АБ-150 МГц достигнуто на высоте 0,2 м при мощности льда более 1 м и на высоте 0,4 м при мощности менее 1. Для АБ-250 МГц подъем антенны оказал негативное влияние, которое выражалось в виде существенного ослабления амплитуды, вплоть до полного затухания отраженного сигнала на контрольной границе вода – донные отложения на глубине 3-5 м. Антenna АБ-400 МГц продемонстрировала наименьшие средние относительные ошибки в сравнении с другими антеннами при ледомерных работах. Наилучшие результаты по измерению льда получены при сохранении снежного покрова и подъема антенны от 0,4 м и выше. При определении толщины льда с поверхности чистого льда, наиболее оптимальным положением антенны получилась высота 0,4 м. .

Таблица 3.3 Оценка средних относительных ошибок измерений мощности льда антеннами АБ-250 МГц и АБ-400 МГц

Антена	Высота антенны, см		30.11	12.01	27.01	4.02	24.02	5.03	17.03	15.04	$\delta = (\Delta x/x) * 100$								$\delta_{ср}$
	Фоновые бурения, см		33	62	75	85	102	107	110	113									
АБ-250 МГц	ПР1	0	28	88	80	95	105	120	120	125	15.2	41.9	6.7	11.8	2.9	12.1	9.1	10.6	13.8
		20	40	100	115	105	130	135	125	130	36.4	19.4	46.7	11.8	24.5	14.0	4.5	4.4	17.6
		40	39	75	90	105	110	115	120	150	3.0	40.3	33.3	0.0	19.6	18.7	4.5	17.7	18.7
		60	42	90	105	105	140	120	120	170	9.1	24.2	20.0	0.0	29.4	4.7	0.0	17.7	13.9
	ПР2	0	35	70	75	100	100	110	110	115	21.2	32.3	40.0	5.9	39.2	9.3	9.1	48.7	25.0
		20	36	80	95	95	110	115	105	120	3.0	16.1	26.7	5.9	9.8	4.7	4.5	4.4	10.9
		40	38	100	90	105	115	110	110	135	6.1	32.3	6.7	11.8	4.9	4.7	4.5	13.3	11.7
		60	41	93	95	110	120	110	110	130	9.1	11.3	6.7	5.9	4.9	0.0	0.0	4.4	6.0
АБ-400 МГц	ПР1	0	26	95	77	105	120	115	120	130	45.5	3.2	24.0	5.9	0.0	4.7	9.1	0.0	7.8
		20	38	90	90	100	110	120	180	120	36.4	8.1	17.3	5.9	9.8	4.7	54.5	8.8	15.5
		40	36	80	90	100	110	120	180	130	6.1	16.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8	5.0
		60	33	70	100	100	120	120	190	120	9.1	16.1	13.3	0.0	9.8	0.0	9.1	8.8	9.0
		80	28	65	-	-	105	-	150	-	15.2	8.1	-	-	14.7	-	36.4	-	9.3
	ПР2	0	29	75	70	80	105	110	105	105	3.0	16.1	-	-	0.0	-	40.9	-	9.0
		20	32	60	80	95	100	110	160	110	9.1	24.2	13.3	17.6	4.9	0.0	50.0	4.4	16.2
		40	34	65	80	85	105	105	160	110	6.1	8.1	0.0	11.8	4.9	4.7	0.0	0.0	5.6
		60	32	65	85	85	105	115	130	105	6.06	0.00	6.67	0.00	0.00	9.35	27.2 7	4.42	7.86
		80	35	60	-	-	105	-	125	-	9.09	8.06	-	-	0.00	-	4.55	-	3.47

3.3 Методические подходы георадиолокационного исследования водных объектов с поверхности льда

На основе наблюденных закономерностей и параметров, в результате проведенных натурных исследований на участке реки Лены, выделены основные критерии, влияющие на результативность работ. Основными критериями, необходимыми для учета при проектировании зимних работ являются: динамические изменения накопления снега, нарастания льда, электропроводность воды, а также выбор используемого оборудования (табл. 3.4).

Таблица 3.4. Влияние на эффективность георадиолокации водных объектов с поверхности льда

Категория факторов	Влияние факторов
Физические свойства льда и снега	Толщина льда, его однородность и наличие трещин могут значительно изменять параметры отражения и прохождения радиоволн. Непостоянная структура льда затрудняет интерпретацию получаемых данных, так как волны могут рассеяться или отражаться неоднородно.
Атмосферные, погодные условия	Зимние условия часто сопровождаются резкими изменениями температуры, которые могут приводить к образованию конденсата на оборудовании и ухудшению контакта антенн с поверхностью льда. Это может создавать дополнительные искажения в получаемых данных.
Методические сложности	Оптимальный выбор частоты для георадиолокации в зимний период является критически важным. Соотношение длин волны всего частотного спектра зондирующего сигнала по отношению к мощности льда и снега влияет на количество энергии, распространяемой в исследуемую водную среду и донные отложения.
Интерпретация данных	Из-за сложной структуры льда и донных отложений, а также присутствия снега, данные могут содержать множество отражений и искажений. Это затрудняет анализ и интерпретацию результатов, так как необходимо различать целевые сигналы от фоновых шумов. Водные объекты криолитозоны часто имеют сложные и неоднородные донные отложения, что может приводить к значительным вариациям в отражательных характеристиках.

Согласно аналитическим расчетам и упрощенной численной модели влияние льда, как модельной среды вносит изменения в амплитуду сигнала, лишь количеством отражения на границе «снег – лед» и «лед – вода». Затухание в самой толще практически не влияет на зондирующий сигнал, отсюда следует, что если принять допущение, что лед однородная изотропная среда с толщиной, превышающая длину волны зондирующего сигнала и вызывает отражение сигнала равное 0,66, то амплитуда сигнала на контрольной границе при определенных значениях толщины льда и воды будут стремиться к равным значениям (рис. 3.6).

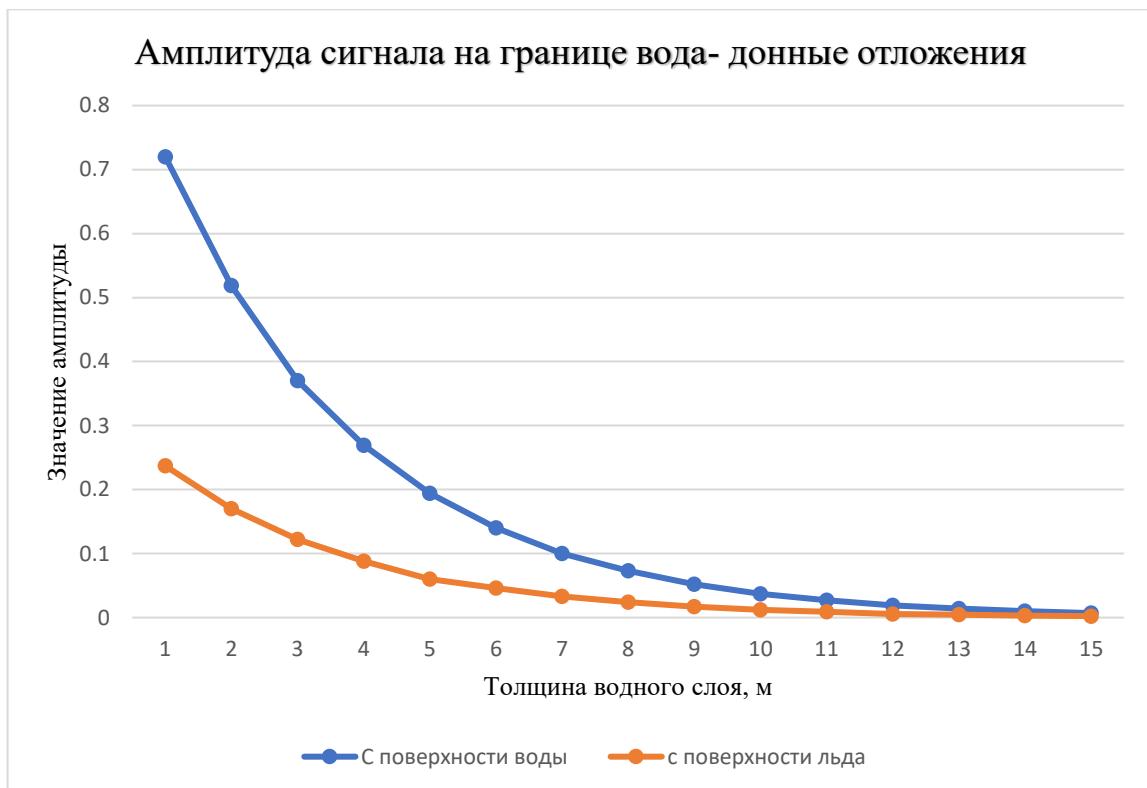


Рисунок 3.6 – Разница амплитуд на границе воды и донных отложений при зондировании с воды и льда для антенны с частотой 150 МГц

По представленному графику видно, что при глубине воды более 10 м, значения амплитуды сигнала вода – донные отложения, при съемке с поверхности воды и при съемке с поверхности льда, стремятся к нулю. В то же время, при малых глубинах в диапазоне от 1 м до 8 м, разница значений амплитуд достаточно высокая, что говорит о потенциально лучшей проникающей и разрешающей способности георадиолокации с открытой водой, но вместе с этим, сохраняется возможность эффективного применения метода с поверхности льда. Следует

отметить, что для расчетов электропроводность воды принята за 10^{-5} См/м, соответствующей усредненным значениям для пресноводных объектов.

Таким образом, по расчетам можно сделать вывод о том, что для достижения значения сопоставимых амплитуд на границе дна в обоих подходах, необходимо выполнение множества условий, которые в реальной практике встречаются достаточно редко. Дополнительным фактором, ограничивающим эффективность зондирования со льда, является неоднородная структура льда, которая усложняется в течение всего периода его нарастания. Соответственно, для разработки и формулировки методических подходов, касательно зимней георадиолокации установлено, что эффективность подходов сопоставима при следующих условиях:

- 1) Мощность льда больше длины волны и вызывает отражение более 67 % амплитуды зондирующего сигнала.
- 2) Структура и свойства льда не вызывают существенного затухания и дополнительного отражения от неоднородностей.
- 3) Глубина водного объекта более 10 м, при этом электропроводность составляет 10^{-5} См/м.

Проведенные натурные эксперименты на полигоне позволили определить параметры георадиолокации с поверхности льда пресноводных водоемов для эффективного применения метода георадиолокации в зимний период. Установлено, что лед, в зависимости от его толщины, незначительно способствует затуханию сигнала, однако отражение на границе «лед – вода» остается основным ограничивающим фактором, влияние которого зависит от контраста диэлектрических проницаемостей. То есть, в течение всего зимнего периода, отражение сигнала будет перманентным. Соответственно повышение эффективности зимних исследований на водных объектах, сводится к решению проблем, связанных с рассеиванием и дополнительными отражениями в самой толще льда, а также в выборе оптимального сезона для достижения максимальной глубинности. Глубинность же метода в большей степени определяется толщиной водного слоя, где значения удельного затухания сигнала кратно превосходят значения во льду и снеге. Следовательно, если сравнивать эффективность

исследований в рамках одного водного объекта, то нужно учитывать характер ледостава, снижение уровня воды в зимний период, а также минерализацию воды в половодье и межень, влияющую на электропроводность.

При этом следует отметить, что это результаты экспериментов получены в определенных условиях с конкретно заданными параметрами толщины снега и мощности льда, для георадиолокационных сигналов диапазона 75 МГц – 375 МГц и нуждаются в апробировании на других участках для оценки репрезентативности рекомендаций и обоснования применимости данного подхода в составе комплекса исследований водных объектов криолитозоны в зимний период.

Выводы

В результате проведенных натурных исследований на полигоне подтверждены методические особенности георадарных исследований донных отложений водных объектов суши с поверхности снега и льда, которые состоят из следующих действий:

- 1) При мощности льда более 1 м и наличии трещин, поднимать антенный блок на высоту 0,2 м для 150 МГц при обследовании глубоководных объектов и 0,4 м – при обследовании неглубоких объектов.
- 2) Поднимать антенный блок на высоту 0,4 м для 250 МГц для уменьшения воздушных помех и повышения глубинности исследования.
- 3) На всех водных объектах для определения мощности снежного и ледяного покровов возможно применение антенны с частотой 400 МГц, для которой предусмотрена возможность поднятия подвижного блока до 1 м с целью регистрации верхней границы льда. Для регистрации полезной информации под ледяной толщей не хватает энергии сигнала.

Использование предложенной методики с применением полезной модели будет востребовано в условиях Крайнего Севера и сплошного распространения мерзлоты, где водные объекты начинают промораживаться уже в середине октября и остаются в ледяном покрове до начала мая.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РЕК И ОЗЕР ЯКУТИИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД С УЧЕТОМ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

4.1 Методический подход для снижения уровня помех при георадиолокации линейных сооружений с поверхности чистого льда

Республика Саха (Якутия) – крупнейший субъект Российской Федерации, полностью расположенный в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Центральная Якутия – это часть региона с наиболее развитой инфраструктурой, на территории которой расположены большое количество крупных, линейных, инженерных сооружений (нефте- и газопроводы, линии электропередач и водоснабжения, автомобильные и железные дороги). Практически все объекты пересекают разнообразные водные объекты, а их строительство оказывает влияние на состояние пересекаемых ими водных преград. В ходе эксплуатации линейных сооружений на участках подводного перехода существенное влияние на их состояние оказывают русловые и гравитационные процессы (Омельяненко, 2013). Для предотвращения риска повреждений и предупреждения аварийных ситуаций, большинство технических, в том числе ремонтных работ на инженерных сооружениях с подводным переходом проводятся в зимний период. При этом для уточнения местоположения линейного сооружения нередко необходимо применять геофизические методы. В условиях распространения мерзлых горных пород наиболее приемлемы методы высокочастотной электроразведки, в том числе георадиолокация. Основа эффективности георадиолокации – достаточная глубинность исследований сред верхней части разреза в сочетании с высоким разрешением по слоям и возможностью дистанционных измерений в заданных азимутальных направлениях. Методические особенности георадарного зондирования донных отложений пресноводных водоемов в зимний период разработаны с целью повышения эффективности применения метода георадиолокации с поверхности ледяного

покрова рек и озер, в том числе при поиске локальных объектов на дне реки и в донных отложениях.

Опытно-методические работы по оценке эффективности георадиолокационных исследований с поверхности льда проведены на участке перехода газопровода через реку Лену, в районе п. Хатассы. Цель работ заключалась в определении возможности контроля качества прокладки и состояния технологического основания в зимний период.

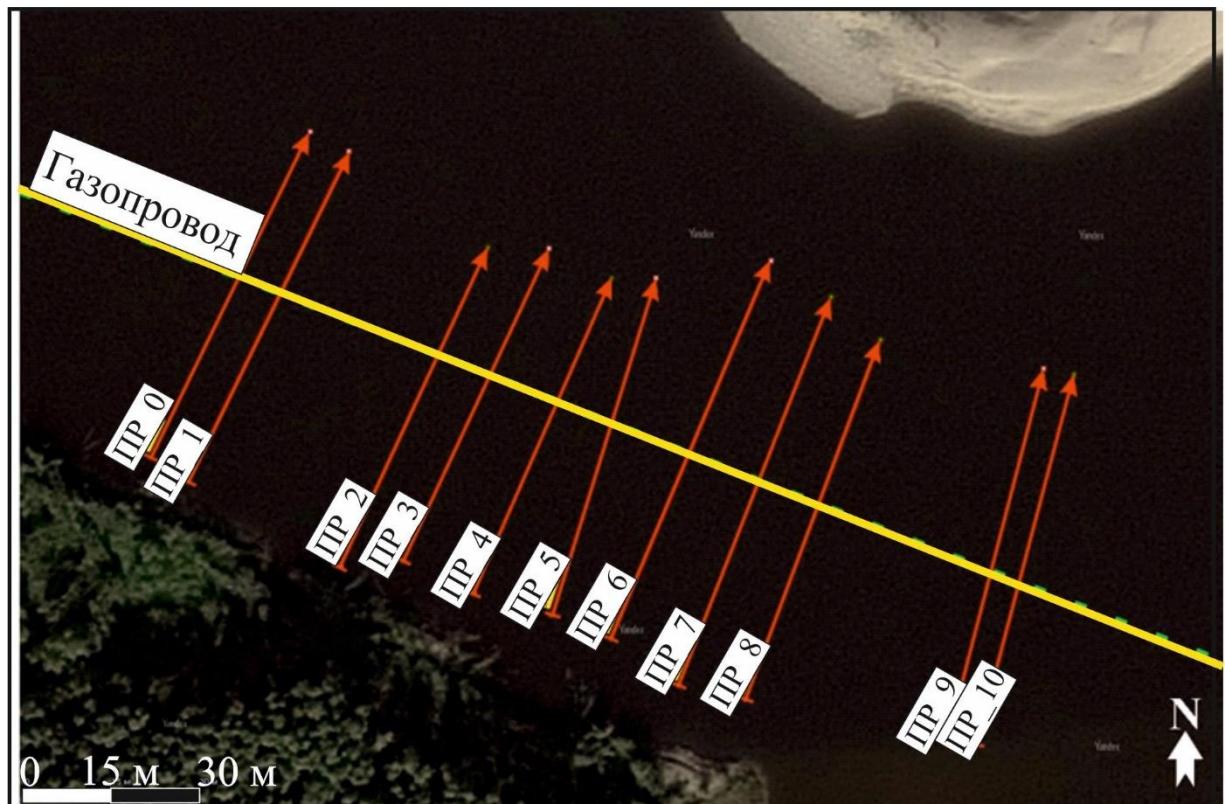


Рисунок 4.1 – Участок натурных экспериментов на действующем подводном магистральном газопроводе

Участок работ характеризуется большой зашумленностью, на георадарной записи. На месте обследования постоянно находилась крупная техника, выполнявшая ремонтные и профилактические работы на трубопроводе. Ледяной покров на участке протоки был полностью очищен от снега и характеризовался наличием множества технологических майн с размерами, достаточными для проведения дайверских исследований и надзора состояния трубы. По результатам зондирований отслежена конфигурация дна водоема до глубины 6 м. Обнаружен трубопровод в месте технологической конструкции нагрузки для устранения

смещения по дну. На георадиолокационном разрезе трубопровод выявляется как локальная неоднородность.

Для натурного эксперимента с подъемом антенны на участке исследований выбран профиль № 2 с осложненной структурой льда. На рисунке 4.2 представлены радарограммы, полученные антенной 150 МГц. Представленный разрез подвержен влиянию помех, вызванных трещинами (майнами) во льду, которые перекрывают полезный сигнал, что затрудняет обработку и интерпретацию полученных данных. Поэтому для апробации методического подхода с поднятием антенные блоки были помещены на антеннное устройство. Исходя из предыдущих экспериментов, отрыв антенны от поверхности льда должен сокращать количество высокочастотных помех, отраженных от трещин во льду. Естественный фильтр в виде воздушного слоя, имитирующего снег, способствует к более качественным результатам.

На представленных данных, полученных на осложненном участке выполнено 5 итераций сканирования. Положение блока антенны менялось относительно поверхности исследований с шагом 0,2 м. При первом поднятии можно наблюдать сокращение влияния низкочастотных помех в сравнении с разрезом, полученным в контакте со льдом. При достижении высоты 0,4 м амплитуда сигналов, отраженных от дна, повысилась и зафиксирована как максимальное значение ($A=25$) на профилях по всем высотам. Дальнейшее поднятие антенны значительно снижает воздушные помехи от трещин во льду, но при этом снижает и полезные сигналы от рельефа дна, что, в свою очередь, уменьшает глубинность исследования донных отложений водоемов.

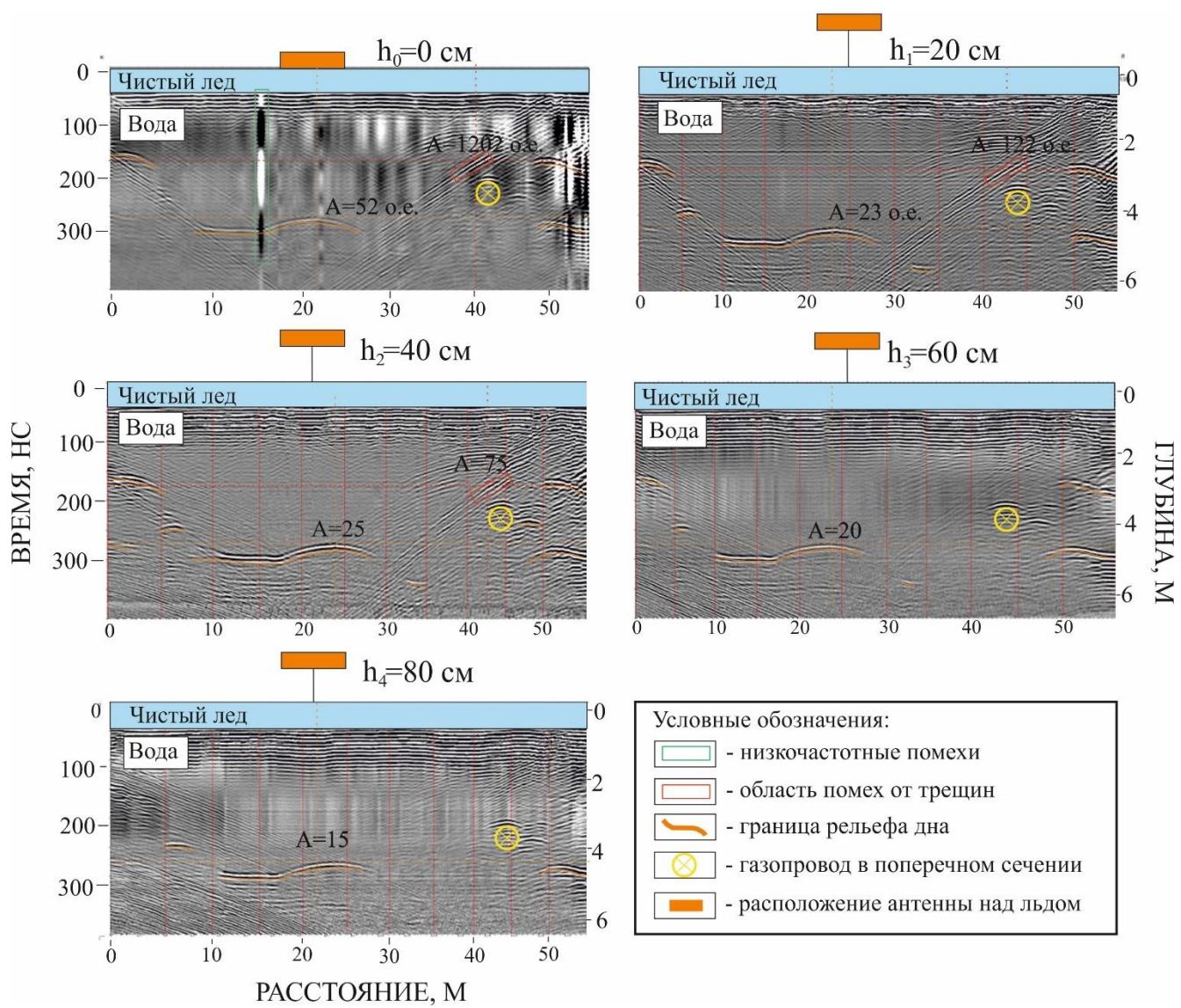


Рисунок 4.2 – Георадарные разрезы с поднятием антенны АБ-150 МГц

Далее представлены результаты, полученные антенной АБ-250МГц с увеличением высоты положения антенны до 1 м (рис. 4.3). В случае для данной антенны, при высоте 0,2 м наблюдается максимальное значение амплитуды отраженного сигнала из всех положений в отрыве от поверхности. В конкретном случае, данная георадарная запись на высоте 0,2 м может быть принята, как наиболее визуально информативная радарограмма для сканирования объекта в реальном времени. В связи с этим имеет смысл рекомендовать перед началом площадных георадиолокационных обследований на крупных участках, проводить опытно-методические работы по определению оптимальных положений антенн, исходя из их центральной частоты, мощности льда и степени трещиноватости поверхности.

В представленном случае, на участке газопровода с толщиной льда 1,1 м положение антенны на высоте 0,2 м является оптимальным по амплитудным соотношениям. Так, определив амплитудные значения сигналов, отраженных от рельефа дна, и амплитудные значения помех над искомым локальным объектом, была определена оптимальная высота подъема антенны АБ 250 МГц, которая составила 0,2 м. В остальных случаях также сохраняется уменьшение помех над объектом, а также сохраняется возможность обнаружения трубопровода и регистрации части границы дна.

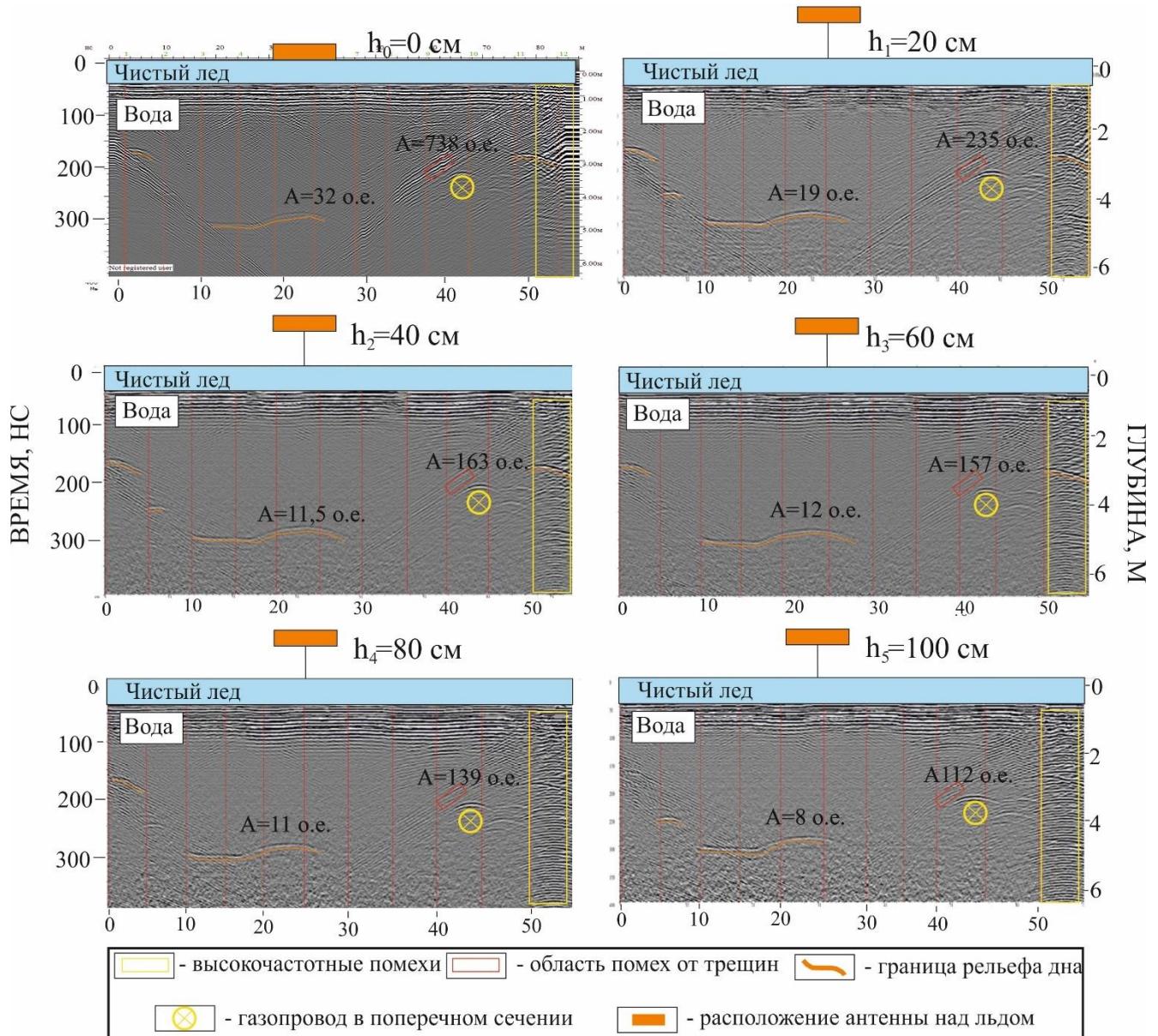


Рисунок 4.3 – Георадарные разрезы с поднятием по профилю 1, АБ-150 МГц

Помимо антенн с центральными частотами 150 МГц и 250 МГц, для оценки мощности и структуры льда была проведена съемка антенной АБ-400 МГц. По результатам сканирования определено, что мощность льда практически не изменяется по всей длине профиля (1,2 м) и коррелирует с данными бурения лунки (1,1м) (рис. 4.4).

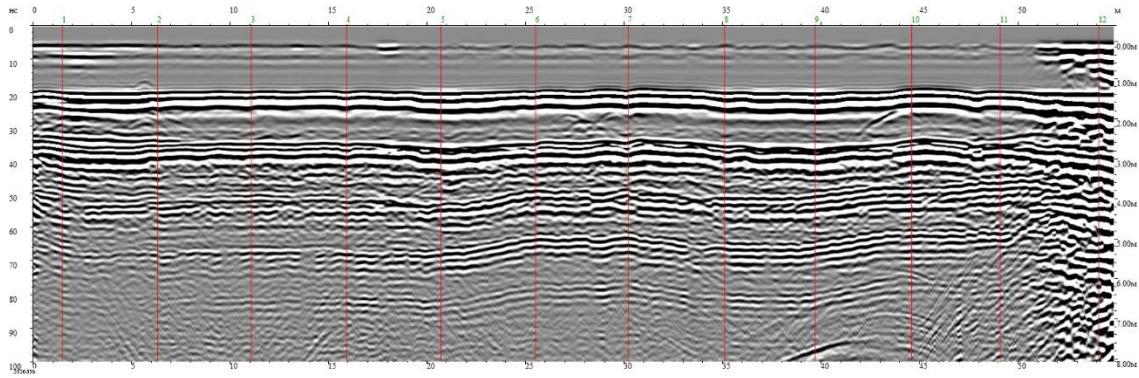


Рисунок 4.4 – Профиль 2, АБ400МГц, без поднятия антенны

Таким образом, апробация методики и антенного устройства на участке речного перехода газопровода прошла результативно. По итогам работы на газопроводе можно выделить проблему перекрытия полезного сигнала помехами, источниками которых могут стать неоднородности в самой ледяной толще, при мощности слоя более 1 м. Для решения задач, связанных с линейными подводными объектами, при определении их положения (направления) или при поиске локальных объектов, автономность и мобильность установки позволяет проведение площадной съемки под разными углами профилей зондирования.

При эксплуатации продуктопроводов необходимо регулярно проводить обследования линейных инженерных сооружений на речных переходах. При этом, как правило, первоначально известна ось расположения трубопровода, например, по пикетам его береговых выходов. Таким образом, зная проектную ось положения трубопровода, опытно методическими работами можно определить фактическое расположение трубопровода и оценить его горизонтальное смещение.

Исследование по ледовому покрову с учетом всех особенностей, дает преимущество над гидрорадиолокацией в возможности зондирования с положения,

при котором центр георадара находится непосредственно над исследуемым объектом.

4.2. Батиметрия и анализ строения донных отложений озер Бестяхской террасы с поверхности льда

Озера, распространенные в криолитозоне, представляют собой ключевые индикаторы динамики мерзлотных ландшафтов и важных компонентов регионального гидрологического цикла. Морфология дна таких водных объектов, может свидетельствовать о термическом режиме водоема, об интенсивности термической абразии берегов, а также может отражать распределение таликов (Бойцов, 2002). Батиметрическая съемка озер позволяет получить данные о рельефе дна, необходимые для понимания гидродинамики водного объекта, оценки объемов воды, анализа донных отложений и их влияния на качество воды.

Традиционный комплекс методов включает эхолоты, гидролокаторы и лидары (Родионов, 2018; Старовойтов, 2019). Акустические методы, однозначно, обладающие большей проникающей способностью по воде, сталкиваются с некоторыми ограничениями, связанными с сезонной доступностью объектов исследования. То есть, применение гидроакустических методов с поверхности льда ограничено и нецелесообразно (Ryazantsev, 2021).

Внедрение метода георадиолокации в состав криогидрологических исследований открывает новые возможности для эффективного и детального картографирования глубин озер, а также для анализа строения донных отложений с поверхности льда. Возможность эффективного сканирования водных объектов в зимний период, является уникальным преимуществом георадиолокации в сравнении с акустическими методами. Наличие сезонного льда в период весны и зимы обеспечивает новые и безопасные логистические пути до удаленных, арктических объектов, а также выступает в роли стабильной платформы, позволяющей производить высокоточные привязки данных. В связи с этим, георадарное обследование может быть включено в комплекс гидрологических и

гидрогеологических исследований как достоверный метод для батиметрической съемки водных объектов и исследований структуры донных отложений.

Однако, несмотря на описанные преимущества и возможности, существуют ограничения, связанные с затуханием электромагнитной волны в водном слое и высокой зависимостью глубинности от минерализации (Владов, 2009; Лаломов, 2017). В зимний период, дополнительным ограничителем становится ледяной покров, который вносит дополнительные отражения. Глубина зондирования с поверхности льда, как показали Moorman B. и Michel F. может достигать 19 м в зависимости от условий исследуемого водного объекта (Moorman, 1997). Для проектирования батиметрических работ методом георадиолокации важным фактором является выбор сезона для полевого сбора данных (Лаломов, 2017; Ермаков, 2012). Таким образом, оценка эффективности зимней георадиолокации сводится к сравнению двух подходов с отличающимися условиями съемки, а именно – зондирования с поверхности льда и открытой воды.

Так, например для оценки эффективности зимней георадиолокации, на озерах-источниках Бестяхской террасы в Центральной Якутии проведены измерения в разные временные сезоны одного года (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Расположение объектов исследования на карте

Георадарная съемка с поверхности льда выполнена в весенний период, характерный максимальным накоплением снежного покрова и максимальной толщиной льда. На момент измерений ручным бурением определена толщина льда для трех озер: Юнегестях – 0,8 м, Эльгэн – 0,7 м, Манчия – 0,85 м. Снежный покров составил 0,2-0,3 м, физические характеристики отличают слабая плотность и низкая влажность. Для определения батиметрии озер выполнена площадная съемка. Регулярная сетка наблюдений в среднем для всех озер составила 1000 x 800 м. Шаг между профилями составил 50 м. Сама георадарная система состоит из антенного блока георадара ОКО-3, АБ-150 МГц и оптического одометра (рис. 4.6).

По результатам зондирований, выполненных с ледяной поверхности, по двум озерам Манчия и Юнгестях проанализированы строение дна и донных отложений. На озере Эльгэн, зафиксировано высокое затухание сигнала, вследствие чего рельеф дна в большей части разреза на множестве профилей не просматривался.



Рисунок 4.6 – Георадарная система в связке с мотобуксировщиком

Исследования, выполненные с открытой воды, проводились в осенний период 2022 г. Для площадной съемки также использовалась антенна АБ-150 МГц. Антенна располагалась на буксируемой ПВХ-лодке без надувного дна, которая, в свою очередь, крепилась к боковой части основной лодки. Основным осложняющим фактором для площадной георадарной съемки с поверхности воды оказалось сложность в соблюдении равномерной скорости и направления профилей, а высокая степень влияния погодных условий. Для рассмотрения и анализа преимуществ и ограничений каждого из подходов, будут сопоставлены осенние и весенние данные, в результате чего будут обоснованы методические особенности для проектирования георадарных площадных измерений на водных объектах криолитозоны.

Озеро Юнгестях. Данное озеро имеет прямоугольную форму с общей площадью примерно $0,4 \text{ км}^2$, 700 x 550 м. Толщина льда на момент зондирования составляла 0,8 м. Минерализация воды составила 140–160 мг/л. На рисунке 4.7 представлены результаты георадиолокационных исследований, выполненных с поверхности открытой воды и со снежно-ледового покрова.

ВРЕМЯ, НС

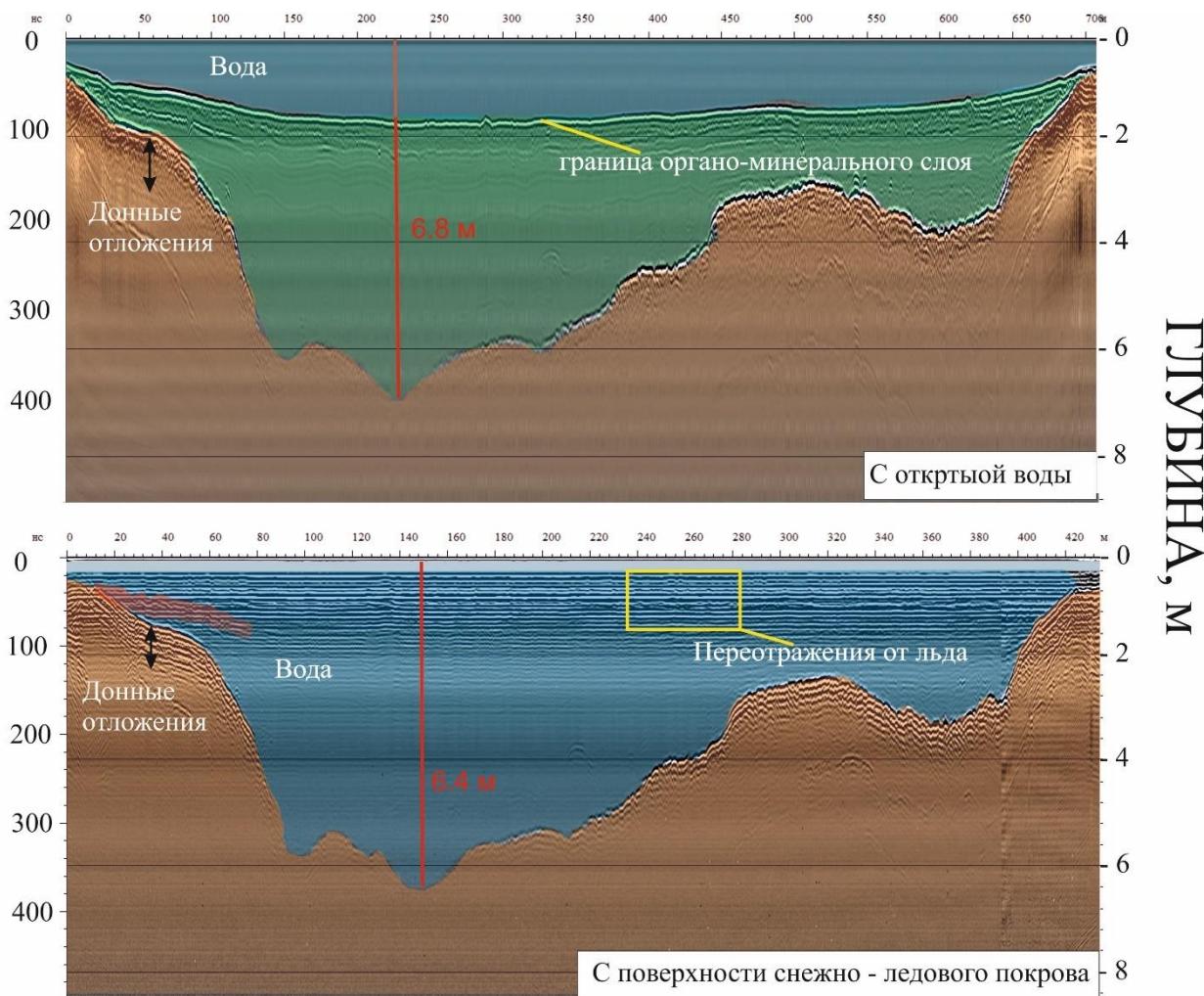


Рис. 4.7– Сравнение радарограмм озера Юнегестях полученных на одинаковых координатах

При сопоставлении разрезов и оценке глубины зондирования можно отметить, что съёмка с открытой воды позволила уверенно зафиксировать выраженный отражающий горизонт на глубине около 2 м, интерпретируемый как граница органо-минерального слоя, химический состав которого был описан для аналогичных озёр Бестяхской террасы в монографии Анисимовой Н. П. и Павловой Н. А. (Анисимова, 2014). На радарограмме этот контакт проявляется как линейное непрерывное высокоамплитудное отражение, отделяющее верхнюю органогенную толщу (сапропели, торфянистые осадки) от более плотных донных отложений (Ryazantsev, 2021; Старовойтов, 2008; Старовойтов, 2016). В пределах профиля граница прослеживается достаточно равномерно, без выраженных нарушений и разрывов, что указывает на стабильные условия осадконакопления.

Сравнение с результатами по озеру Полевское, представленными Рязанцевым П. А. и соавторами, показывает общность в характере выделения стратиграфических контактов (Ryazantsev, 2021). Так, в работе с использованием георадиолокации с водной поверхности отмечается аналогичное проявление границ между органогенными и минеральными толщами в виде чётких высокоамплитудных отражателей, ассоциируемых с контактами сапропелевых горизонтов и глинистых осадков. При этом авторы фиксируют локальные турбидитные тела, нарушающие непрерывность отражений, что отличает их материалы от представленных разрезов, где таких признаков не наблюдается.

При съёмке со льда обнаружение верхней части записи осложнено из-за появления переотражений от границы «лед–вода». Георадиолокационный профиль, демонстрирует характерные для донных отложений отражающие горизонты. В верхней части разреза наблюдается зона пониженной амплитуды, связанная с прохождением электромагнитной волны через ледяной покров и водную толщу. Ниже отчётливо фиксируется высокоамплитудная граница, соответствующая контакту органо-минерального слоя, зарегистрированного по данным с воды, с подстилающим более плотным массивом минеральных осадков. Минеральное дно характеризуется неоднородной структурой, что проявляется в виде субпараллельных отражающих горизонтов. Это приводит к маскировке слабоконтрастных границ и ухудшению разрешающей способности. Тем не менее, донный рельеф фиксируется достаточно уверенно, глубина в центральной части профиля составляет 6,4 м. При этом глубина исследования донных отложений, в представленных условиях на озере Юнгестях составила до 1 м. На рисунке 4.8 представлена радарограмма, на которой выделены фрагменты волновых картин, характеризующих строение донных отложений.

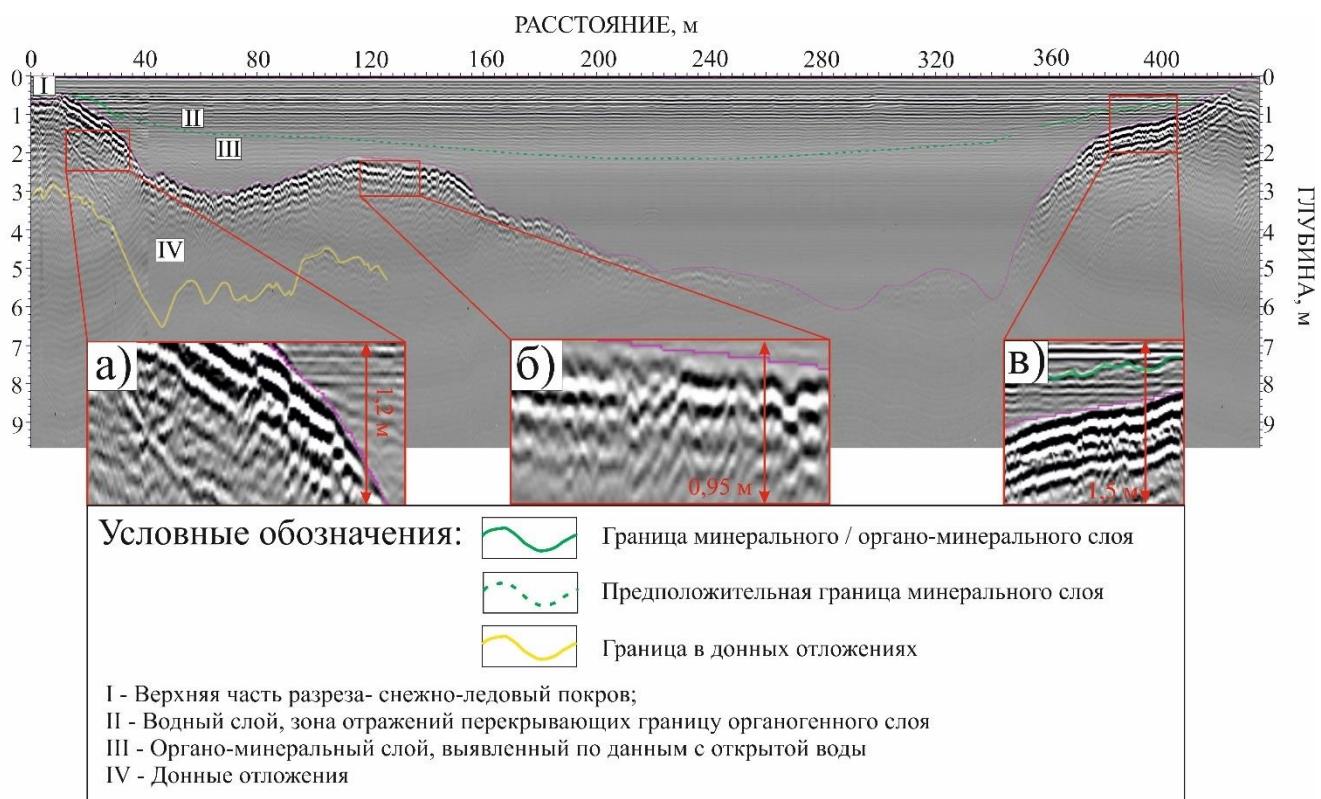


Рисунок 4.8 – Фрагменты волновых картин донных отложений озера Юнгестях, по данным зимней георадиолокации:

- а) четкие слоистые отражения; б) сильные прерывистые сигналы, волнистая текстура; в) слабое отражение органо-минерального слоя и более четкое отражение от плотных отложений

По представленным данным, полученным с поверхности льда, однозначно можно оценить целостность строения донных отложений (Старовойтов, 2008; Бричева, 2020). Для интерпретации вещественного состава слагающих дно пород, можно обратиться непосредственно к строению самой Бестяхской террасы. Согласно исследованиям, изучавшим естественные обнажения, отложения террасы состоят из мелкозернистых хорошо сортированных песков, переслаивающихся с тонкозернистым песком и алевритом (Анисимова, 2014; Правкин, 2018; Банщикова, 2007). Согласно методам интерпретации, представленных в учебном пособии Старовойтова А. В., волновые картины фрагментов (а), (б) и (в) можно охарактеризовать как последовательность параллельных отражающих горизонтов средней амплитуды, что может свидетельствовать о постепенной аккумуляции органо-минерального материала. Сохранение устойчивой структуры указывает на стабильные седиментационные условия с возможным чередованием органического

и минерального вещества в донном осадке. Фрагмент (а) демонстрирует относительно однородный пакет отражений с признаками горизонтальной слоистости. Фрагмент (б) отражает участок, где фиксируются более размытые, локально деформированные сигналы. Амплитуда отражений здесь несколько ниже, а характер их залегания менее регулярный. Такая волновая картина может быть связана с изменением характера осадконакопления, например, с увеличением органического материала или с локальными нарушениями в донных отложениях. Фрагмент (в) выделяется ярко выраженными контрастными сигналами высокой амплитуды и отчетливой стратификацией. В нижней части фрагмента прослеживаются мощные отражающие горизонты, соответствующие минеральному основанию донных отложений. Такая структура свидетельствует о выраженном литологическом контрасте между органо-минеральным слоем и подстилающими минеральными грунтами. В данном случае можно предполагать наличие плотных песчаных или алевритовых слоев, обеспечивающих столь четкие отражения.

Таким образом, анализ волновых картин на отдельных фрагментах указывает на сложное строение донных отложений озера. Чередование зон с разной интенсивностью отражений подтверждает стратиграфическую неоднородность: от относительно мягких и однородных органо-минеральных отложений (а) через зоны деформации или повышенной органики (б) к плотным минеральным основаниям (в). Такой комплексный характер отражений позволяет более детально реконструировать условия осадконакопления и стратиграфию донных горизонтов.

На приведённом ниже георадарном разрезе (рис.4.9) для участка между ПК 261–292 была проведена детальная обработка в программном комплексе GeoScan32 с применением инструмента «гипербола», позволяющего анализировать дифрагированные волны, и по их геометрии определять диэлектрическую проницаемость среды.

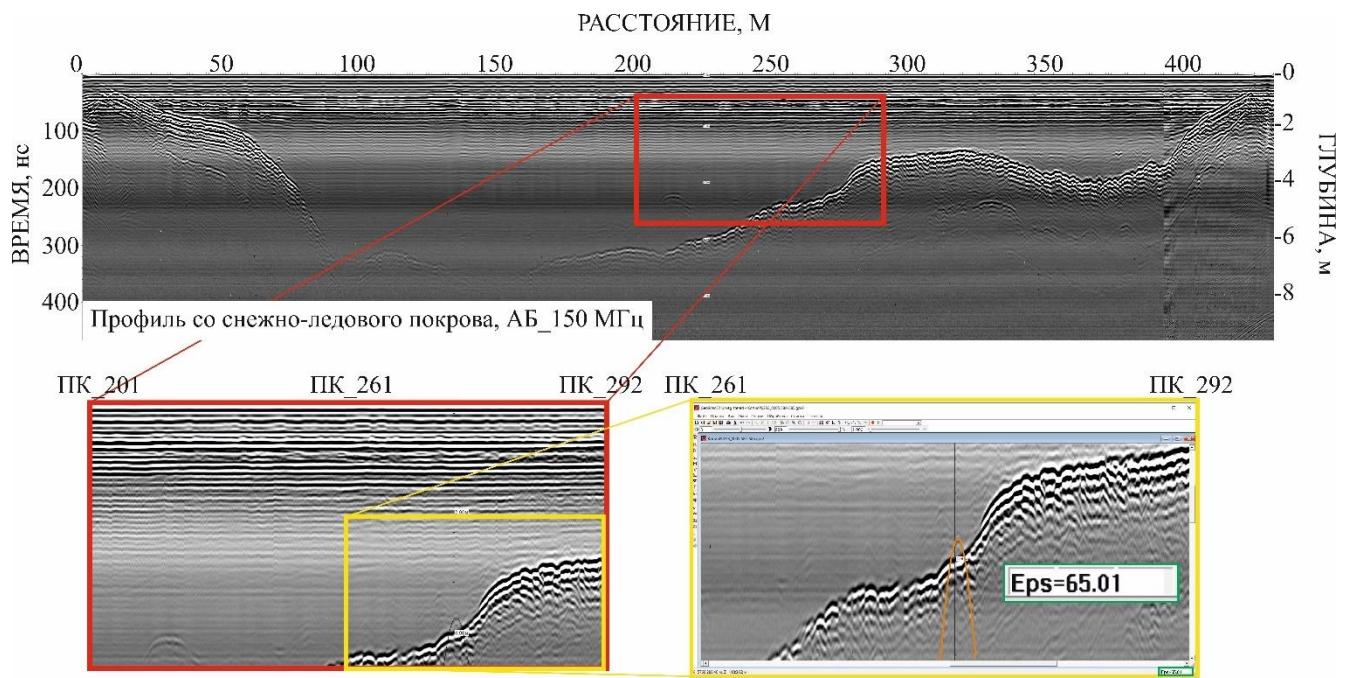


Рисунок 4.9 – Результаты применения инструмента «гипербола» на данных зимней георадиолокации

Физическая основа метода заключается в том, что электромагнитная волна при встрече с точечными или линейными неоднородностями формирует дифрагированные поля, которые на радарограмме проявляются в виде гипербол. Аппроксимация этих кривых с использованием известных соотношений радиолокационного времени и геометрии трассирования позволяет вычислить скорость распространения электромагнитной волны в среде, а через неё – значение диэлектрической проницаемости. В данном случае получено значение $\epsilon \approx 65,01$, что указывает на водонасыщенные осадочные породы.

Вместе с тем необходимо отметить ограничения метода. Надёжность аппроксимации гипербол зависит от чёткости их проявления на радарограммах, что возможно не во всех геологических условиях, особенно при слабом контрасте между слоями или выраженной анизотропии. Кроме того, результаты отражают усреднённые свойства среды и не позволяют учитывать её мелкомасштабную неоднородность. Тем не менее применение инструмента «гипербола» остаётся одним из наиболее надёжных способов количественной оценки электрофизических характеристик донных отложений методом георадиолокации. Проведение измерений со льда обеспечивает стабильное положение антенн, отсутствие влияния

ветровых волн и точную географическую привязку профиля, что значительно повышает точность вычисления скорости волны при выделении гиперболы. Именно поэтому данный результат подтверждает, что метод гиперболического анализа в условиях зимних съёмок на акватории остаётся одним из наиболее перспективных инструментов для изучения строения и свойств донных отложений.

Озеро Манчия. Озеро имеет округлую форму с размерами 0,6 x 0,53 км. Всего выполнено 10 профилей с шагом ~60 м. Глубина исследований составила 5 м (рис. 4.10). На радарограммах озера Манчия отчётливо прослеживаются несколько стратиграфических слоев, которые по характеру отражений и значениям диэлектрической проницаемости интерпретируются следующим образом: верхняя часть разреза соответствует снежно-ледовому покрову и водной толще глубиной порядка 2,8 м. Под слоем воды выделяется органо-минеральная толща мощностью $\approx 1,5$ м, проявляющаяся на радарограмме в виде высокоамплитудного, относительно непрерывного отражающего горизонта ($\epsilon \approx 50$). Ниже этого горизонта регистрируется слой донных отложений с более низкой диэлектрической проницаемостью ϵ (≈ 30) (Ryazantsev, 2021; Старовойтов, 2016). Донные отложения по волновой картине и по изменению амплитудных и фазовых характеристик сигналов могут быть интерпретированы как влажный песок или грубозернистый алеврит с высокой степенью насыщенности водой. Сама граница донных отложений прослеживается в пределах профиля и имеет достаточно устойчивую форму, что указывает на наличие выраженного литологического контраста между верхним органогенным слоем и подстилающими минеральными породами.

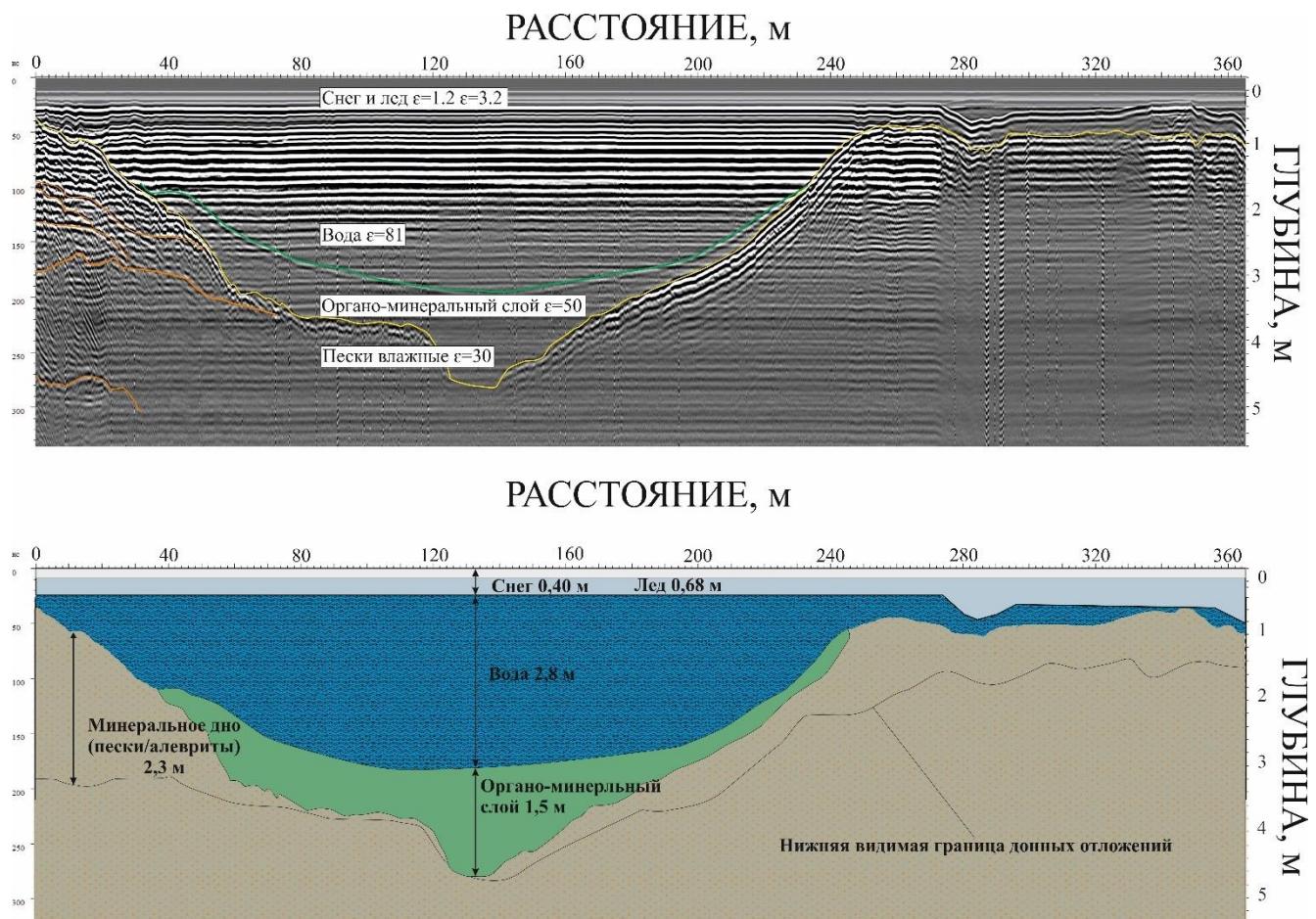


Рисунок 4.10 – Литологическое строение озера Манчия по данным георадиолокации

При оценке корректности построенных границ можно установить, что верхняя граница органо-минерального комплекса проявляется как согласный амплитудный переход по всей площади профиля. Нижняя граница органо-минерального слоя также детектируется уверенно, и на радарограмме наблюдается заметное изменение кривизны и амплитуды отражений.

Возможность наличия песка обосновывается характером отражений (относительно резкие горизонты, умеренное затухание сигнала) и геометрией залегания, что соответствует строению песка или алеврита со значительной водонасыщенностью. Однако следует отметить, что литологическая интерпретация как песок/алеврит остаётся гипотетической.

Карта глубин. Сравнение радарограмм, полученных в разные сезоны сводится к оценке глубинности для каждого подхода. В представленном озере, по двум наборам данных, собранных в разное время, получены сопоставимые

результаты. Средняя глубина исследования отличается на ~1,2 м, однако данная разница обосновывается снижением уровня воды и толщиной льда, которая составила в среднем 0,8 м на момент обследований. Форма рельефа лучше прослеживается на данных с водной поверхности. Минерально-органический слой также имеет лучший контраст на данных с воды. Несмотря на расположение данной границы на достаточной глубине (от 2 м), на которой кратные переотражения не оказывают сильного негативного влияния, на разрезах со льда сигнал, отраженный от этих отложений, имеет слабый контраст. В результате площадных съемок, построена карта глубин, представленная на рисунке 4.11.

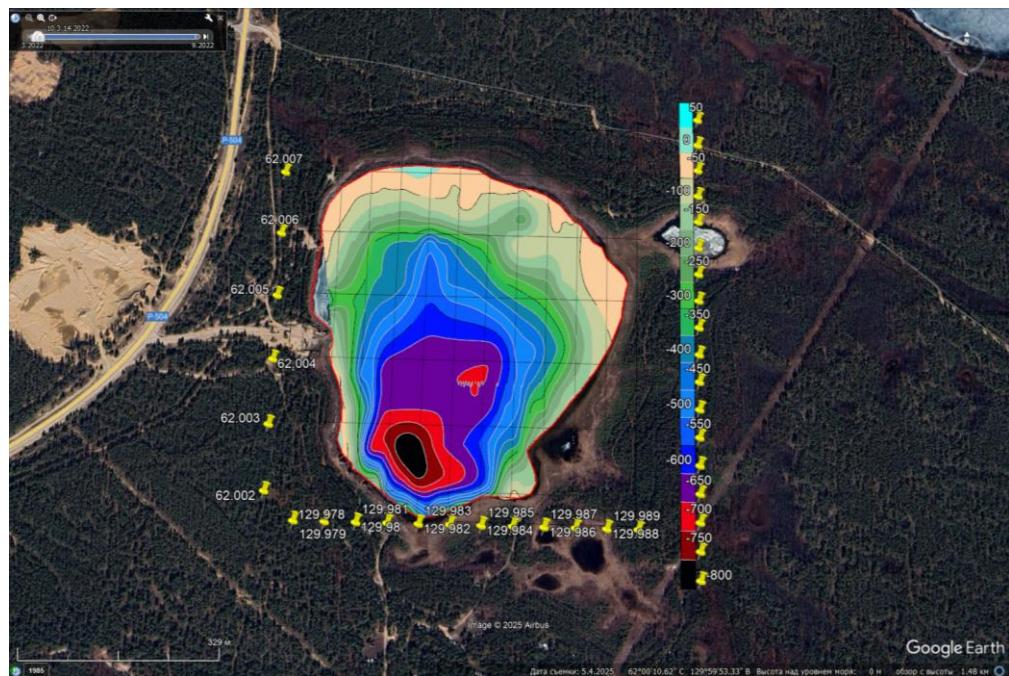


Рисунок 4.11 – Карта глубин озера Манчия, по данным георадиолокации

Опытно-методические работы. Помимо регулярной съемки, на основании имеющегося опыта и набора данных, собранных в ходе мониторинга на реке Лене с целью изучения влияния снежного и ледяного покрова на эффективность метода георадиолокации, на озере Манчия проведен эксперимент с применением антенного устройства. Для эксперимента выбран профиль, пройденный при выполнении площадной съемки. На озере Манчия органоминеральный слой расположен на глубинах от 1,8 м до 3 м и не перекрывается переотражениями от льда, однако слабая контрастность полезного сигнала обусловлена ослаблением зондирующего сигнала с увеличением глубины. Мощность льда, определенная

бурением лунки, составила 0,85 м, толщина снежного покрова равна 0,2 м. При зондировании фрагмента профиля с применением антенного устройства на высоте 0,2 м, визуально наблюдается незначительное сокращение области переотражений на радарограмме и усиление контрастности полезного сигнала в том числе и гипербола локального объекта (рис. 4.12). На высоте 0,4 м перекрытие переотражениями полезных сигналов на радарограмме уменьшилось с 1,6 до 1,3 м, но также наблюдается и ослабевание полезного сигнала.

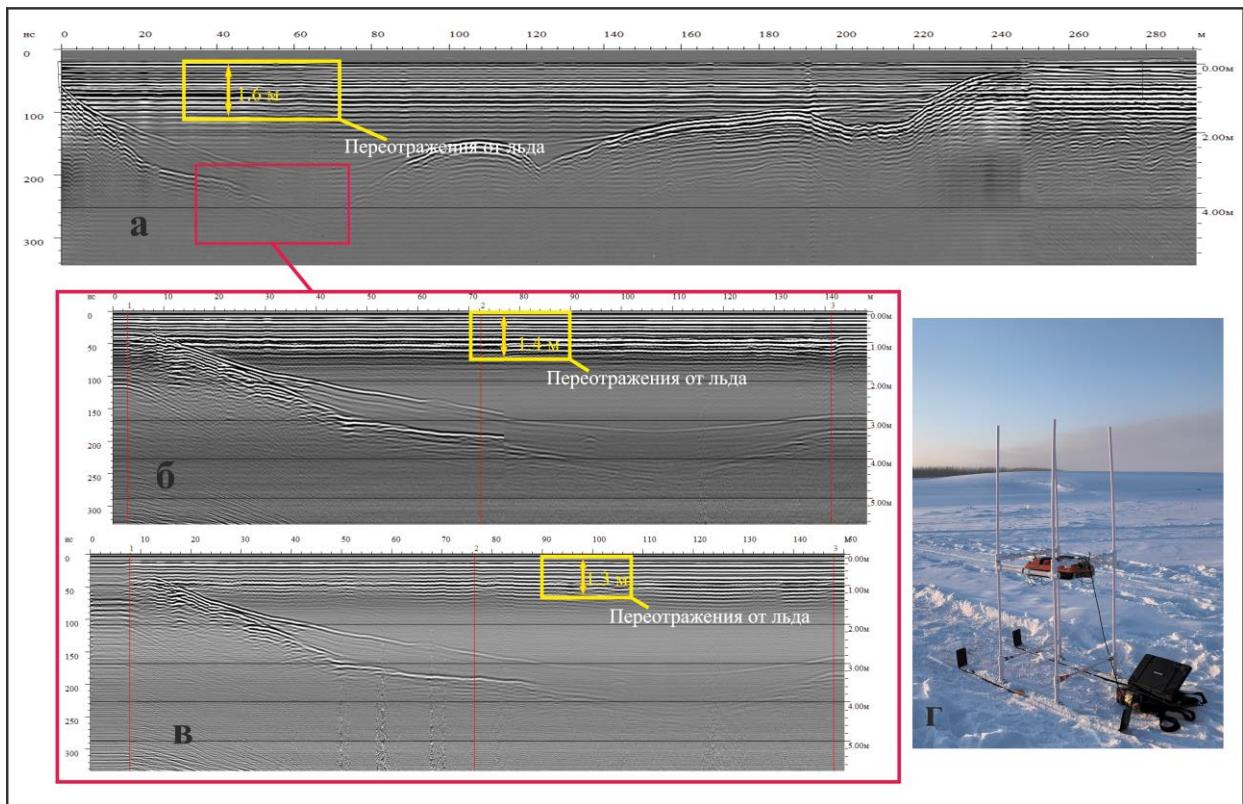


Рис. 4.12. – Результаты эксперимента с дополнительными измерениями антенным устройством, фрагмента георадарного профиля: *а* – георадарный профиль, полученный в ходе площадной съемки в контакте со льдом; *б* – профиль, полученный на высоте 0,2 м, антенной АБ-150 МГц; *в* – профиль, полученный на высоте 0,4 м, антенной АБ-150 МГц; *г* – антенное устройство

По данным, собранным на озерах Центральной Якутии, установлено, что глубина исследования с поверхности льда сопоставима с глубиной исследования с водной поверхности. На контрастность границ и разрешающую способность, значительное влияние оказывает мощность ледяной поверхности, от которой теряется часть энергии зондирующего сигнала и возникают помехи, перекрывающие полезную информацию. В результате исследования озер

установлено, что переотражения от льда с мощностью более 0,75 м может перекрыть часть информации, в верхней части разреза. Наличие органогенного слоя может быть определено вычисляемым значением диэлектрической проницаемости при помощи инструмента «гипербола», который показывает суммарное значение диэлектрической проницаемости всех слоев до дифрагированного сигнала. При наличии снежного покрова с мощностью более 0,2 м и ненарушенным строением ледяного покрова, антенное устройство практически не влияет на эффективность и качество измерений.

4.3 Поиск перспективных участков скоплений ископаемой мамонтовой кости в среднем течении реки Колымы с поверхности льда

Скопления биогенных полезных ископаемых обильно встречаются в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Практически все обнаруженные находки сопряжены с геоморфологическими процессами: речная эрозия, термоэроздия, оползни, оттаивания и т.д. То есть, большинство крупных скоплений бивней мамонта формируются в процессе различных видов термоэроздии и приурочены к водным объектам в результате денудации костеносных коллекторов (Смирнов, 2020; Смирнов, 2007; Кириллин, 2010). С связи с этим, наиболее перспективными местами для поиска и последующей добычи, отвечающим регламентированным способам добычи ископаемой мамонтовой кости (ИМК), являются донные отложения пресноводных водоемов в арктической части криолитозоны.

Таким образом, выбор метода георадиолокации при поиске ИМК обоснован перспективностью для поиска локальных палеонтологических объектов в водной среде. Преимущество данного метода, с учетом физических свойств и небольших размеров бивней мамонтов, состоит в достаточной разрешающей способности в исследованиях на водных объектах. ГРЛ позволяет выделять аномалии, связанные с залеганием костных остатков.

Для обоснования эффективности метода и определения морфологических особенностей водных объектов, потенциальных для поиска ископаемой

мамонтовой кости, проведены натурные исследования в среднем течении реки Колымы. Для проведения натурных экспериментов ключевое значение имеет место проведения моделирования. В данном случае – это та местность, где регулярно находят ИМК. Согласно работе Смирнова А. Н. (Смирнов, 2007), Североякутская костеносная провинция (Лено-Колымское междуречье) является уникальной территорией, аналогов которой нет в других регионах российской Арктики и в мире. Костеносность этого региона – уникальнейшее тафономическое явление и по масштабам ресурсов ИМК, и по сохранности этого биогенного материала (Кириллин, 2010). Россыпные скопления ИМК на дне пресноводных объектов суши достаточно сложно поддаются ресурсной оценке ввиду сложности визуального наблюдения, высокой мутности воды и аккумулирования бивней в толщах донных отложений в процессе перезахоронения. Поэтому проблема, связанная с обнаружением и анализом условий залегания объектов мамонтовой фауны, требует комплексного подхода при решении задач поиска и добычи данного вида сырья.

Участок среднего течения Колымы характеризуется сложным геологическим строением. В долине реки широко распространены аллювиальные отложения, состоящие из песков, галечников, гравийно-песчаных смесей и супесей. В зоне среднего течения наблюдаются обширные участки термоэрэзионных процессов, которые создают сложный микрорельеф и формируют залежи рыхлых осадков. Геологическая структура региона указывает на наличие различных полезных ископаемых, включая палеонтологический коллекционный материал.

Методика работ и комплексирование подходов.

Георадиолокационные исследования выполнены антенными блоками на частотах 150 МГц, 250 МГц и 400 МГц. Выбор нескольких частот позволил проводить исследования комплексно, охватывая как глубокие, так и поверхностные слои, и минимизировать пропуски потенциальных местонахождений ископаемой мамонтовой кости, поскольку объекты, такие как мамонтовая кость, имеют размеры от нескольких сантиметров до нескольких метров. Методика определения перспективных участков включает обследования в два этапа: с открытой воды и с поверхности льда. Такой подход обеспечивает

комплексное изучение обширных акваторий с использованием преимуществ каждого из этапов (Горохов, 2025).

Так, на этапе первичной разведки акваторий для выделения зон перспективных для поиска локальных объектов на участке реки выполнены площадные измерения с крупным шагом. При помощи картирования рельефа дна получена информация о наличии значительных понижений, которые являются естественными ловушками для уносимых течением и другими русловыми процессами костных остатков. На рисунке 4.13 представлена карта глубин, построенная с поверхности воды на основе данных, полученных регулярной сеткой измерений с шагом между профилями 100 м (Горохов, 2025).

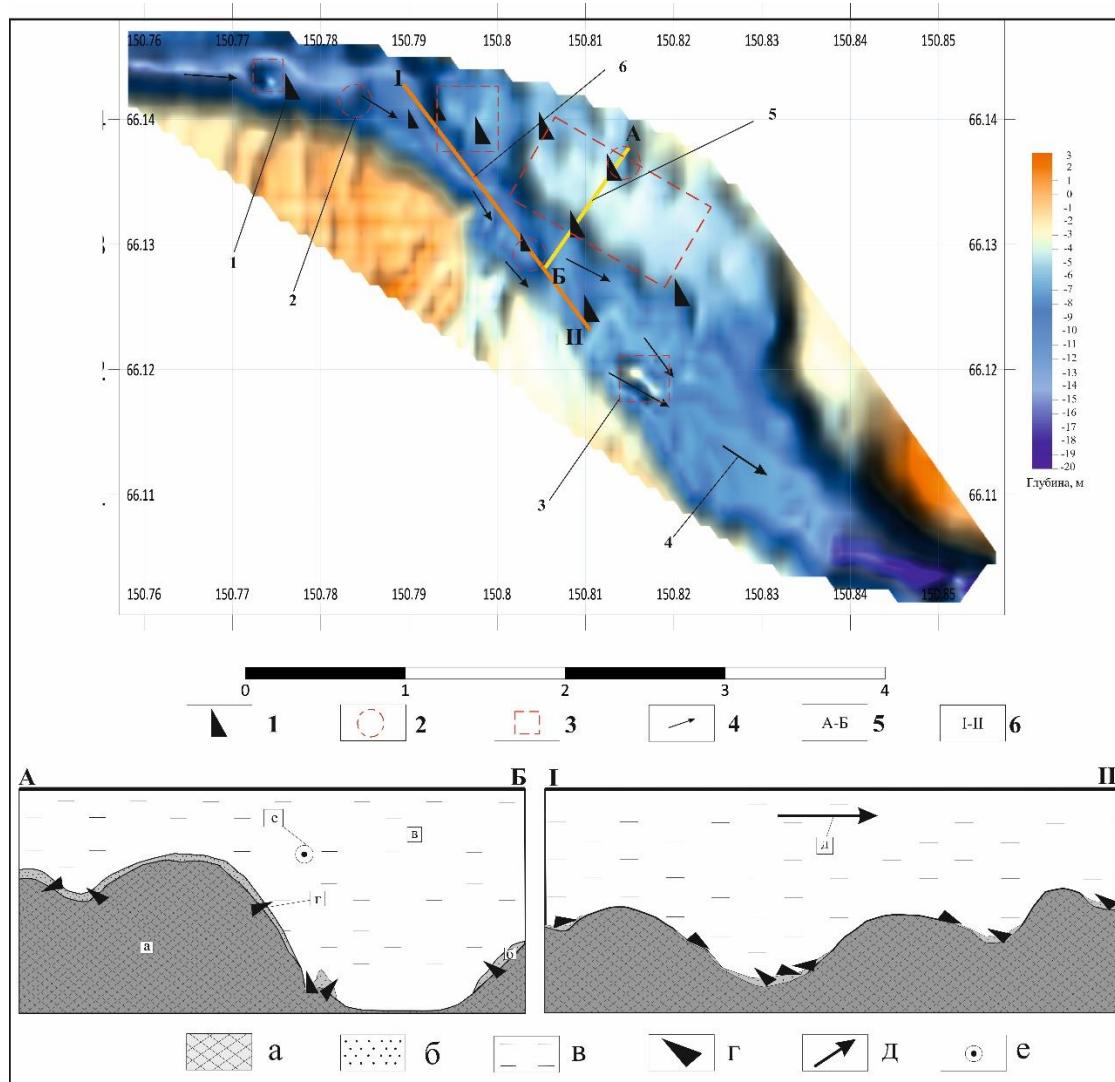


Рис. 4.13 – План-схема участка с распределением глубин и выделенными перспективными участками для поиска бивней мамонта: 1 – зарегистрированные локальные объекты; 2 – естественные ловушки с понижениями в рельефе дна; 3 – наносные структуры; 4 – направление течения реки; 5 – поперечный разрез; 6 –

продольный разрез; а – коренные породы; б – донные аллювиальные отложения; в – водный слой; г – предполагаемый характер залегания БМ; д – направление течения на продольном разрезе; е – направление течения на поперечном разрезе

В результате крупной сети наблюдения изучены геометрия русла, рельеф дна и толщина донных отложений. Проведенные исследования позволили выделить наиболее перспективные для поиска ИМК участки, характеризующиеся наличием значительных естественных углублений и дифрагированных сигналов, зарегистрированных от локальных объектов неизвестной природы, размеры которых были сопоставимы с размерами искомых объектов.

Разрез А-Б характеризует предположительный характер накопления костных остатков при их выпадении из разрушающихся в результате термоэррозионных процессов береговых склонов, сложенных едомными отложениями. Костный объект, высвобождаясь из оттаявших пород, под действием силы тяжести постепенно опускается на дно, задерживаясь на естественных выступающих препятствиях. Русловые процессы, в особенности в период их интенсификации, обеспечивают перемещение обломков и их перезахоронение в наиболее глубоководные части водоема, откуда их дальнейшее перемещение затруднено (разрез I-II).

Так на рис. 4.14 представлены некоторые радарограммы исследуемого участка, с выявленными признаками его перспективности на предмет обнаружения подводных скоплений ИМК.

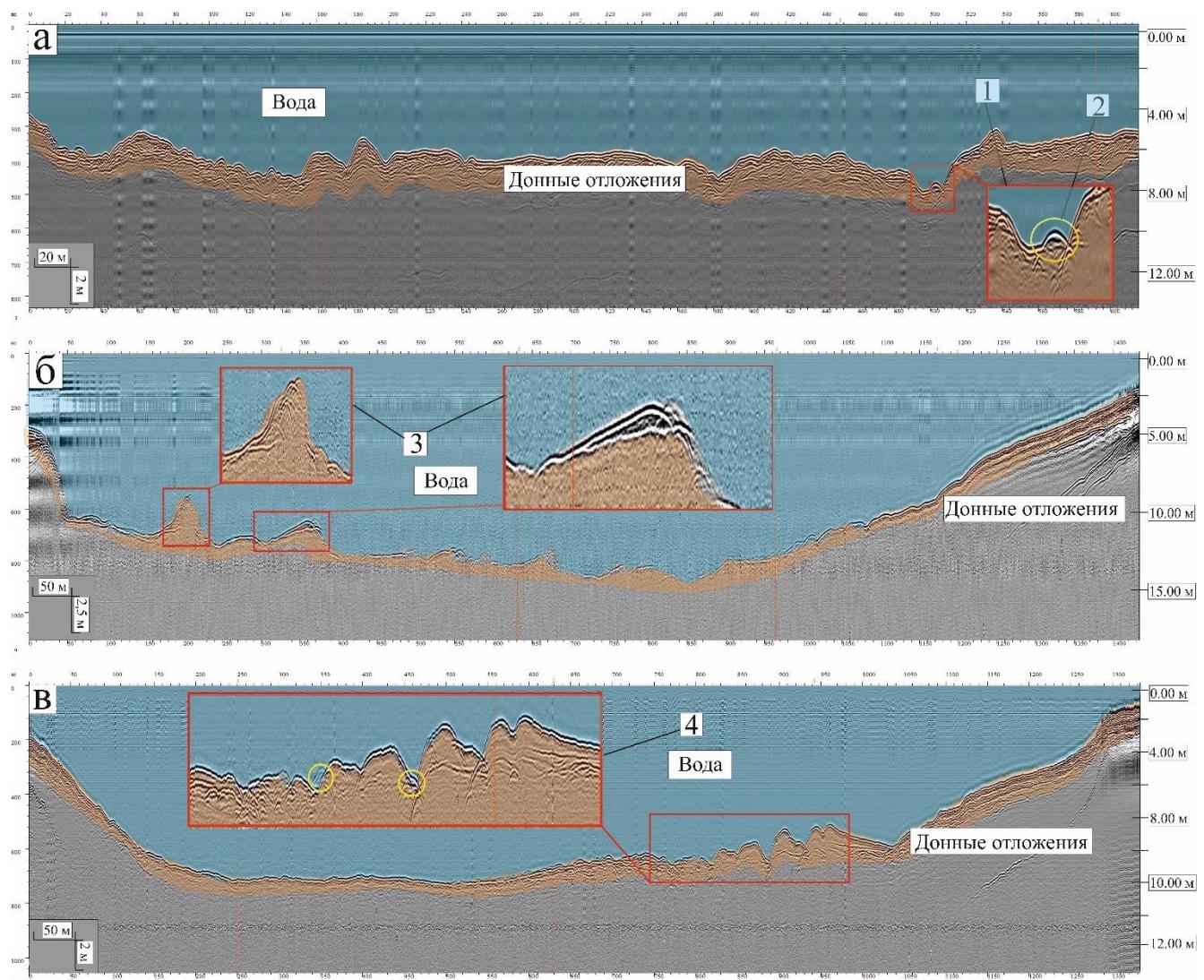


Рис. 4.14 – Радарограммы с выявленными ключевыми признаками: а – радарограмма с локальным объектом в естественном понижении рельефа дна; б – радарограмма с повышениями в рельефе дна; в – радарограмма с донными отложениями с нарушенной структурой и локальными объектами внутри; 1 – естественное понижение рельефа дна; 2 – локальный объект; 3 – повышения в рельефе; 4 – донные отложения с нарушенной структурой

Характерным для объекта на рис. 4.14 (а) является его расположение в естественном углублении на дне изучаемого водоема. Такие сигналы могут быть зарегистрированы от бивней, перезахороненных в процессе русловых гидродинамических процессов (Горохов, 2025). Наиболее высокая вероятность обнаружения искомого объекта появляется при регистрация отраженного сигнала вблизи подводной части берегового склона, когда выпавший из вмещающих пород незадолго до проведения георадиолокационной съемки объект под действием силы

тяжести постепенно сползл по склону и задержался на естественном препятствии, а русловые процессы не успели переместить и перезахоронить объект.

Также на рисунке 4.14 (б) и рисунке 4.14 (в) объекты расположены в донных отложениях с нарушенной структурой, что может свидетельствовать о том, что они продолжительное время находятся на дне водоема и под воздействием речного потока и силы тяжести были перезахоронены в более глубоководных частях дна реки.

В весенний этап съемка выполнена с поверхности льда и снега на снегоходе. Для определения точности георадарного зондирования все георадарные профили были пройдены с использованием спутникового навигатора GPS и оптического одометра, позволяющего вести съемку в режиме по перемещению. Основной упор при зондировании с поверхности льда делался на выбранные перспективные участки, определенные по осенним данным. Снежно-ледяной покров позволил провести площадные измерения с меньшим шагом для детализации выбранных участков и непосредственного поиска локальных объектов. Зондирования выполнены площадной съемкой и отдельными поисковыми уточняющими профилями. Работы в площадном режиме велись с шагом между профилями от 10 до 60 метров. Шаги выбраны исходя из необходимости детального охвата исследуемой площади при оптимальном времени выполнения работ. Каждый профиль регистрировал данные о строении донных отложений, что позволило оценить распределение подводных объектов в пространстве.

Интерпретация данных включала анализ донных отложений, локальных объектов и особенностей речных процессов. Используя глубинные отражения, была проведена классификация слоев по их отражательной способности. Аллювиальные отложения (пески, гравий, супесь) идентифицировались по низкоамплитудным сигналам, тогда как органические отложения (ил, торф), как правило, демонстрируют более высокую амплитуду. Особое внимание уделялось террасам и слоям, где могли быть обнаружены остатки мамонтовой фауны. Гиперболические аномалии, выявленные на радарограммах, интерпретировались как возможные костные останки, крупные валуны или затонувшие деревья. Для

верификации, обнаруженных объектов применялись методы телевизионной фотометрии, позволяющие уточнить природу, размеры и форму объектов, а также их глубину залегания. На радарограммах фиксировались русловые образования, такие как протоки, старицы, эрозионные уступы и подводные гряды. Эти элементы использовались для уточнения мест возможного накопления органических остатков. Также интерпретировались зоны активной эрозии, где могли быть обнаружены древние отложения, содержащие кости.

Далее представлены результаты исследований с поверхности льда нескольких перспективных участков. Произведена оценка морфологических условий дна, характера залегания локальных объектов и влияния ледяной толщи на сигнал.

Участок 1. Мощность льда на исследуемой участке составила в среднем 1,3 м, но, несмотря на это, георадар сохранял достаточно хорошую проникающую способность радиоволн для определения морфологических особенностей дна и донных отложений (рис. 4.15).

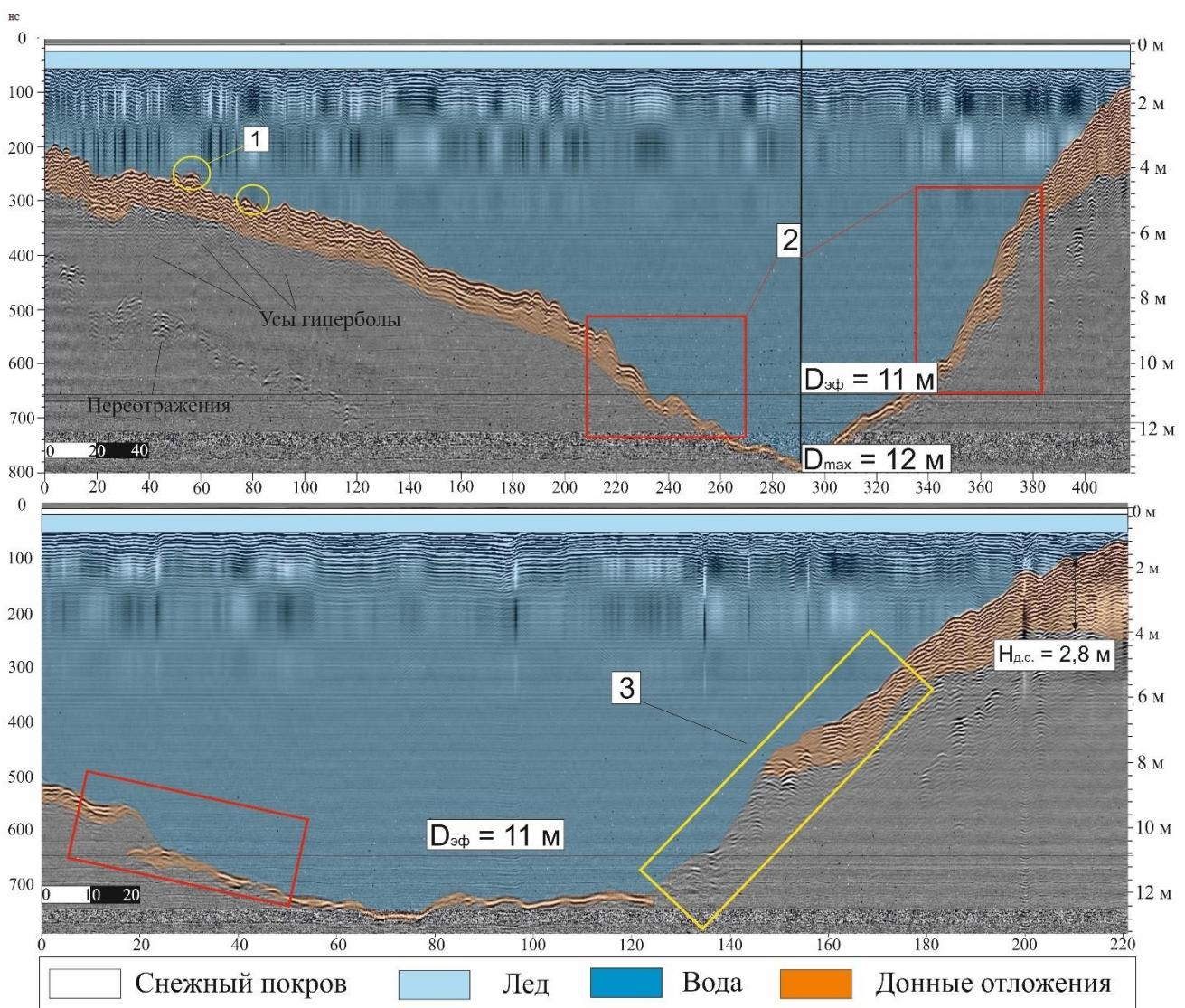


Рисунок 4.15 – Радарограммы участка I, антenna АБ-150 МГц: 1 – отраженные сигналы, синтетрпретированные, как локальные объекты; 2 – потенциальные участки с нарушенными донными отложениями; 3 – подводные завалы деревьев

Радарные данные показали четкую картину рельефа дна до глубины 12 м, с постепенным углублением рельефа ближе к центру русла. Сложившаяся топография указывает на относительно мягкий, но не пологий склон берегов, что может свидетельствовать о наличии некоторых эрозионных процессов, характерных для рек с умеренными течениями.

Одним из наиболее интересных результатов анализа является нарушение структуры донных отложений в определенной области, что может быть связано с присутствием неупорядоченных или перемещенных осадков. Эти изменения в отражающих сигналах требуют более детального изучения для определения их

природы, возможных связей с гидрологическими или тектоническими процессами в регионе.

Особое внимание привлекли одиночные локальные объекты, зафиксированные ближе к берегам. Их природа не была установлена, однако наличие таких объектов в донных отложениях может быть связано с останками животных или другими палеонтологическими находками. С учетом специфики местности и условий, вероятность наличия подводных скоплений мамонтовой кости в этих областях является вполне вероятной.

Метод георадиолокации в режиме площадной съемки продемонстрировал свою высокую эффективность в изучении морфологических особенностей рек, а также в поиске подводных объектов. Благодаря этому значительно повышается мобильность и информативность поисковых работ – георадиолокация позволяет точно определять глубины, структуру и изменчивость донных отложений, что открывает перспективы для дальнейших исследований на данном участке.

На рисунке 4.16, представлена карта глубин изучаемого участка, построенная после анализа всех георадарных профилей. Интерпретация в формате трехмерной модели позволяет провести оценку геометрии всего русла реки, выявить перспективные для аккумуляции костных остатков участки, характеризующиеся наличием крутых понижений и узких ям, и, соответственно, смоделировать условия накопления костного материала.

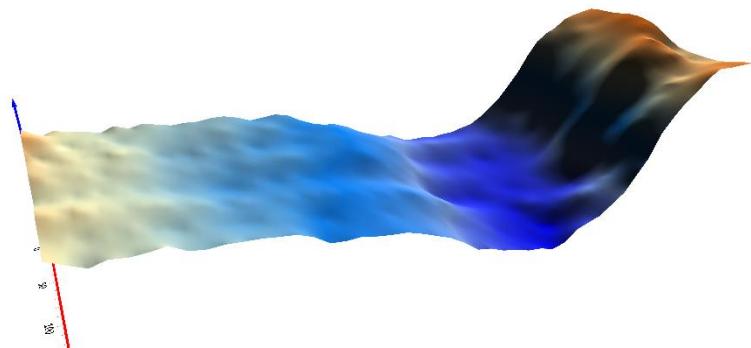


Рисунок 4.16 – Трехмерная карта глубин участка 1

Участок 2. Второй изученный участок имеет размеры 200×500 м. Рельеф в данной области на радарограммах четко прослеживается до глубины 10 м (рис. 4.17). Установлено, что дно углубляется по мере приближения к правому берегу, где склон относительно крутой, в отличие от более пологого левого берега. Эти морфологические различия могут указывать на характер течения и размывающие процессы, что важно для понимания миграции и накопления донного материала.

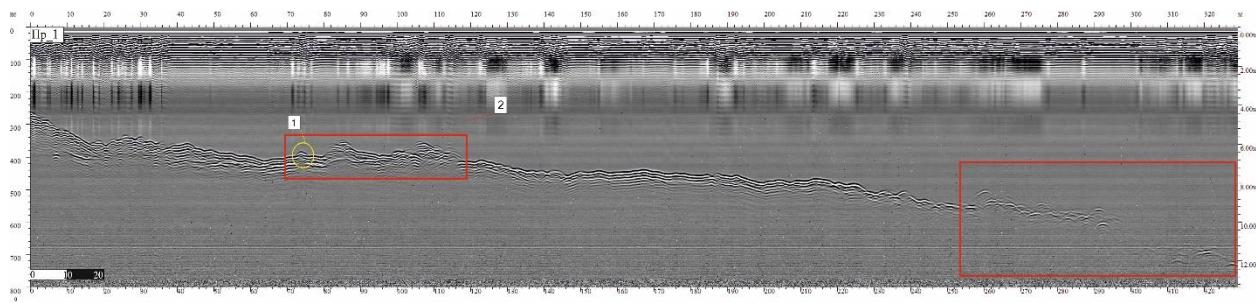


Рисунок 4.17 – Радарограмма профиля 1 на участке II. 1 – локальный объект; 2 – структуры, влияющие на оценку перспективности участка

В некоторых областях донных отложений выявлены значительные нарушения структуры. В центре участка зарегистрированы аномальные зоны, предположительно представляющие собой завалы древесного материала, состоящие из веток, корней и стволов деревьев. Эти скопления могут выполнять роль естественных ловушек для транспортируемых течением объектов, включая кости и бивни.

Ближе к берегам зафиксированы единичные локальные аномалии, природа которых остается неустановленной. Анализ их взаимосвязи с гидродинамическими процессами показывает, что разветвленные корни и ветки древесного материала влияют на поток воды, способствуя размыву окружающих осадков и перемещению мелких объектов.

Выявленные морфологические особенности и зарегистрированные георадаром аномалии делают изученный участок перспективным для дальнейших палеонтологических исследований. Наличие завалов деревьев, выполняющих функцию природных ловушек, а также зафиксированные локальные объекты могут указывать на повышенную вероятность обнаружения подводных скоплений мамонтовой кости.

Дополнительно установлено, что структура донных отложений, сочетающая глубокие слои с локальными нарушениями, предоставляет возможность детального анализа процессов, влияющих на сохранение органических останков в речной среде (рис.4.18).

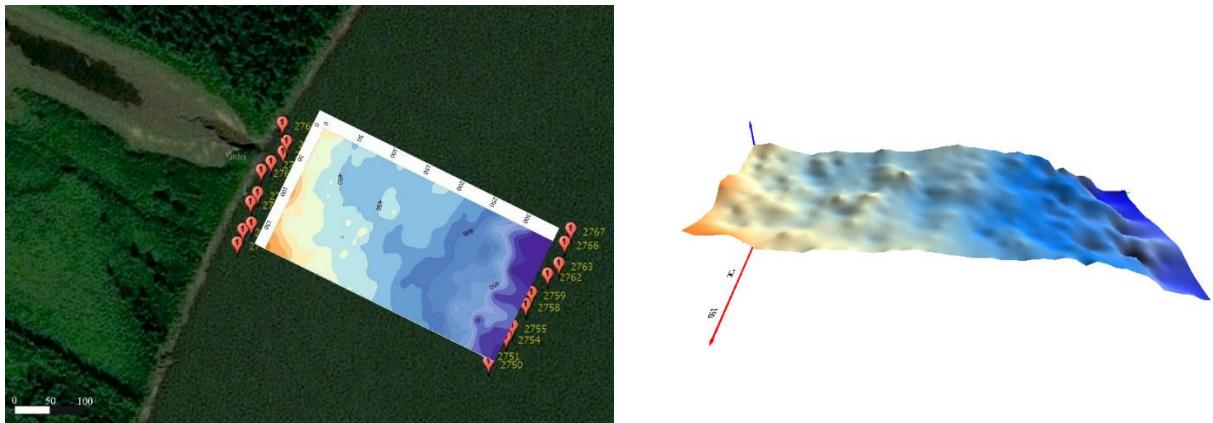


Рисунок 4.18 – Карта глубин, представленная на спутниковом снимке и трехмерная карта глубин участка II

Участок 3. Третий ключевой участок характеризуется выраженным рельефом дна, включающим ярко выделяющиеся бугры, которые по результатам георадиолокационного анализа интерпретированы как аллювиальные отложения. Аллювиальные образования представляют собой слои речного происхождения, состоящие из песка, глины, ила и органических остатков. Формирование таких структур связано с перемещением и осаждением материалов течением реки, что делает их потенциальными зонами концентрации костей и других палеонтологических объектов (рис. 4.19).

На радарограммах четко прослеживается структура донных отложений до глубины 10 м. Установлено, что рельеф дна углубляется ближе к левому берегу, где склон относительно крутой, но не вертикальный, что указывает на активные процессы размыва и осаждения. В нескольких областях донных отложений выявлены значительные нарушения структуры, выраженные множественными мелкими переотражениями. Эти аномалии могут свидетельствовать о присутствии древесных завалов, состоящих из веток, стволов и корней. Как было указано ранее, завалы деревьев играют важную роль в процессах аккумулирования и перезахоронения транспортируемых течением костей и бивней, создавая условия

для их концентрации. Ветки и корни дополнительно изменяют течение воды, способствуя локальному размыву донных отложений и осаждению твердых материалов вблизи.

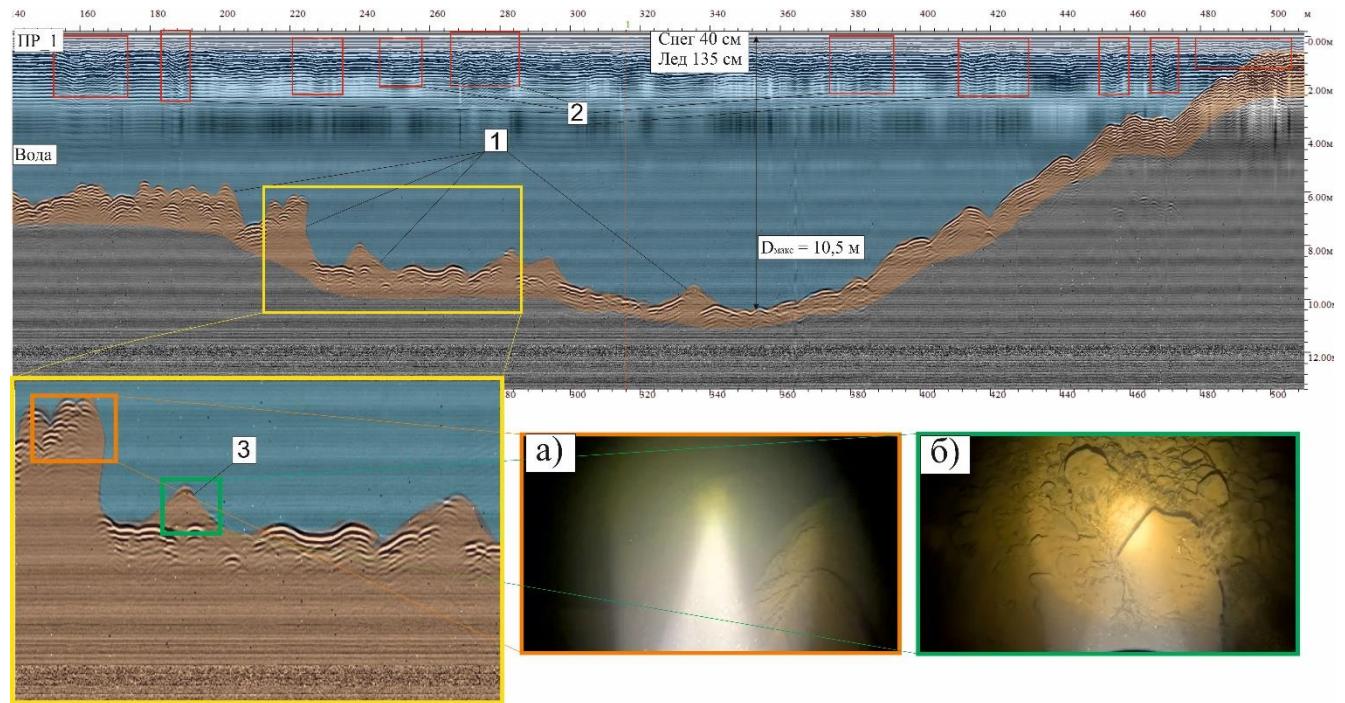


Рисунок 4.19 – Георадарный разрез с подтвержденными находками: 1 – аллювиальные отложения в виде повышений в рельефе; 2 – майны и поисковые лунки во льду; 3 – локальный объект

Аллювиальные отложения, будучи естественными аккумуляторами органического материала, также способствуют сохранению костных остатков благодаря их способности защищать находки от эрозии и размыва. Отложения, представленные на рисунке 4.19 (а) и формирующиеся в условиях интенсивной гидродинамики, представляют интерес для целенаправленного поиска скоплений костей. Естественные ловушки с понижениями рельефа способствуют концентрации транспортируемых объектов, включая кости мамонтов и других животных.

Ирезанный рельеф дна, связанный с впадением ручья, дополняет сложную морфологию участка, создавая естественные углубления и преграды. Эти понижения, выполняют функцию ловушек, где течение теряет скорость, осаждая более крупные частицы и транспортируемые кости. Использование комплекса

водолазного оборудования и георадара позволило идентифицировать ряд находок, включая зуб мамонта (рис. 4.19 (б)).

Выявленные морфологические особенности (рис. 4.20) и зарегистрированные георадаром аномалии делают изученный участок перспективным для дальнейших палеонтологических исследований.

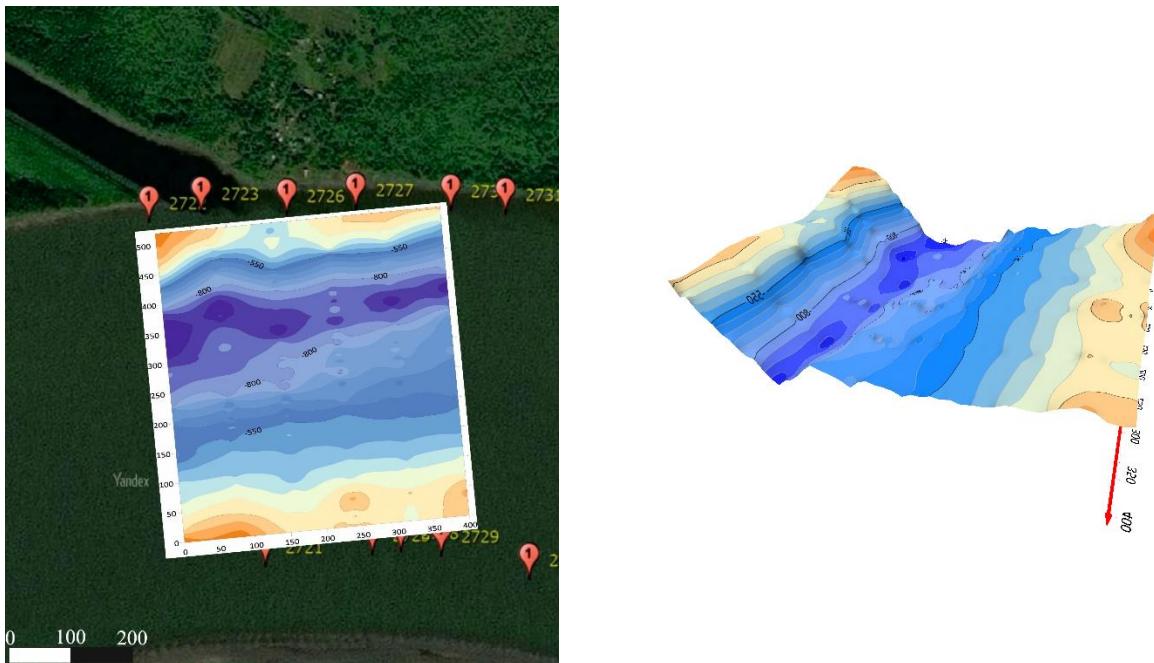


Рисунок 4.20 – Карта глубин, представленная на спутниковом снимке и трехмерная карта глубин участка 3

Несмотря на определенные ограничения, связанные с изменением параметров сигнала при прохождении нескольких сред (снег, лед, вода), проведение поисковых работ со льда способно решить задачу по обнаружению локальных объектов и изучению дна и донных отложений. В сравнении с исследованиями с поверхности воды можно выделить ряд преимуществ: возможность использования одометра для максимально точной географической привязки обнаруженного на дне объекта, отсутствие естественных факторов, влияющих на равномерность и прямолинейность прохождения профилей, а также слабое течение реки для заверки сигналов методами теле-фотометрии или водолазных работ.

Таким образом, эффективность поисковых работ методом георадиолокации с поверхности льда зависит от мощности ледяного покрова и выбранных антенн. Антенны с частотами от 150 МГц и 250 МГц позволяют наблюдать рельеф дна на глубине не менее чем 10 м, при этом их комплексирование поможет зарегистрировать объекты с различными размерами, соответствующими бивням мамонта, их фрагментам и другим предметам отличной природы.

Комплексирование сезонов работ предусмотрено для учета сезонных изменений и особенностей среды. Так, например, в зимний период (с поверхности льда) – ледяной покров обеспечивает стабильную и ровную поверхность для движения георадара. Это позволяет точно выдерживать шаг профилей и получать данные с минимальными искажениями. В осенний период (с поверхности воды) исследования проводились с использованием плавсредств. Такой подход позволил обследовать участки при высоком уровне воды, благодаря чему увеличивается охват прибрежной акватории и открывается возможность изучения рельефа дна и морфологических особенностей донных отложений, позволяющих оценивать перспективность участков на предмет наличия скоплений ИМК. Сочетание исследований в разные сезоны дало возможность изучить объект в полной мере, исключив зоны, недоступные для обследования в один из сезонов.

Выводы

В результате зимних георадиолокационных исследований водных объектов Республики Саха (Якутия) обоснована эффективность метода для решения множества задач. Глубинность и разрешающая способность метода позволили достоверно исследовать морфологические особенности дна озер-источников Бестяхской террасы, а также реки Колымы для оценки перспективности костеносности акваторий. Разработанная антennaальная установка, позволила повысить качество регистрируемых данных за счет снижения влияния помех, а также сокращения области переотражений в верхней части разреза.

Установлено, что антенный блок с частотой 400 МГц достоверно определяет мощность льда, а также внутреннюю структуру. Частоты 150 и 250 МГц показали

высокую эффективность для картирования водных объектов, а также для анализа структуры донных отложений. Установлена высокая зависимость результатов от минерализации воды, отражающая снижение глубинности исследований с возрастанием последней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования, посвященного решению научно-технической задачи, связанной с повышением эффективности георадиолокационного зондирования донных отложений водных объектов криолитозоны в зимний период, установлены закономерности влияния параметров снежно-ледового покрова на распространение электромагнитных волн и разработаны обоснованные методические подходы для повышения достоверности и эффективности георадиолокационных измерений.

Основные итоги работы заключаются в следующем:

1. Выполнен систематический обзор и критический анализ существующих подходов и технических решений в области георадиолокации водных объектов северных территорий. На основе систематизации публикаций и полевых данных установлены ключевые ограничения, связанные с применением метода со льда, и обозначены направления для совершенствования исследований.
2. Полевыми экспериментами получены данные о характере распространения электромагнитных волн в многослойной системе «снег – лёд – вода – донные отложения». Установлены закономерности изменения амплитудно-временных характеристик георадарного сигнала в зависимости от толщины снежного и ледяного покрова при различных частотах зондирования.
3. Численное моделирование позволило воспроизвести процесс формирования георадарного отклика на зимних акваториях и оценить вклад электрофизических свойств и геометрии снежно-ледяного покрова в качество зондирования. Показаны возможности метода для изучения мощности и физических свойств сезонно-мерзлых донных отложений.
4. Разработано новое техническое решение – платформа для нормированного изменения высоты расположения антенн георадара. Экспериментальные испытания подтвердили её эффективность, которая выражается в снижении уровня воздушных помех и повышении глубинности

исследований. Определены оптимальные режимы работы для различных диапазонов частот.

5. Сформирована и успешно опробована методика зимних георадиолокационных исследований донных отложений. Её практическая реализация показала эффективность при решении прикладных задач: от инженерно-геологических исследований, до поиска палеонтологических объектов в донных отложениях.

Таким образом, достигнута поставленная цель: показано, каким образом параметры снежно-ледяного покрова влияют на результаты георадиолокационного зондирования донных отложений пресноводных объектов Якутии и разработаны методические приёмы, позволяющие существенно повысить качество и надёжность регистрируемой информации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн, В. И. Карпухин, В. А. Кутев [и др.]. – М. : Радио и связь, 1994. – 216 с.
2. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / под ред. А. Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
3. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию (рекомендовано УМС по геологии УМО по классическому университетскому образованию в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по специальности 011200 Геофизика) / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Издательство МГУ, 2005. – 154 с.
4. Jol, H. M. Ground Penetrating Radar Theory and Applications / H. M. Jol. – Elsevier Science, 2009. – Р. 524.
5. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации : учеб. пособие / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин. – М. : Изд-во МГГУ, 2008. – 196 с.
6. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982. – 464 с.
7. Ним, Ю. А. Георадиолокация: элементы методологии и аппроксимационной теории / Ю. А. Ним // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2005. – № 4. – С. 45–55.
8. Владов, М. Л. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений / М. Л. Владов, М. С. Судакова. – М. : Геос, 2017. – 240 с.
9. Калинин, А. В. Оценка глубинности георадиолокационных исследований на основе классической теории / А. В. Калинин, М. Л. Владов, Н. В. Шалаева // Вестник МГУ. Серия Геология. – 2003. – № 3. – С. 44–48.
10. Калинин, В. В. Трансформация спектра волновых геофизических сигналов в нелинейных геологических средах / В. В. Калинин, М. Л. Владов, А. Н. Ошкин // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2010. – № 3. – С. 63–68.

11. Александров, П. Н. Теоретические основы георадарного метода / П. Н. Александров. – М. : Физматлит, 2017. – 112 с.
12. Высокоразрешающие волновые методы в современной геофизике / А. В. Калинин, М. Л. Владов, А. В. Старовойтов [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 1. – С. 23–27.
13. Jol, H. M., Junck, M. B., Kaminsky, G. M. High resolution ground penetrating radar imaging (225–900 MHz) of geomorphic and geologic setting: examples from Utah, Washington and Wisconsin // Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2002), 2002. – Р. 69–74
14. Окорочков, А. И. Зависимость зон Френеля от характеристик падающей и рассеянной волн / А. И. Окорочков, А. Н. Самоделов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3. – С. 199–208.
15. Лещук, И. И. Антенны Френеля с вынесенным облучателем / И. И. Лещук, Т. А. Цалиев // Радиоэлектроника. – 1995. – № 9. – С. 37–42.
16. Владов М. Л. Влияние водного слоя на глубинность георадиолокационных исследований на пресноводных акваториях / М. Л. Владов, А. М. Пятилова // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2009. № 1. – С. 63–66.
17. Георадарные наблюдения для оценки проводимости геологической среды. Лабораторный эксперимент / М. Л. Владов, В. В. Капустин, А. М. Пятилова [и др.] // Геофизические исследования. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 5–16.
18. Омельяненко, А. В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород: монография / А. В. Омельяненко, Л. Л. Федорова. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.
19. Нерадовский, Л. Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации / Л. Г. Нерадовский. – М. : РАН, 2009. – 337 с.
20. Титов, А. В. Физическое и математическое моделирование распространения георадарных сигналов в пресноводных водоемах / А. В. Титов, Н. Ю. Бобров, С. С. Крылов // Перспективы развития инженерных изысканий в

строительстве в Российской Федерации : материалы XII Общероссийской конференции изыскательских организаций, Москва, 07–09 декабря 2016 г. – М. : ООО Геомаркетинг, 2016. – С. 350–356.

21. Ryazantsev, P., Rodionov, A., Subetto, D. Waterborne GPR mapping of stratigraphic boundaries and turbidite sediments beneath the bottom of Lake Polevskoye, Karelia, NW Russia // Journal of Paleolimnology. – 2021. – Vol. 66. – P. 261–277.

22. Лаломов, Д. А. Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных / Д. А. Лаломов, В. В. Глазунов // Георесурсы. – 2017. – Т. 1, № 19. – С. 69–77.

23. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3»: техническое описание : инструкция по эксплуатации. – 2018. – URL https://geodevice.uz/upload/iblock/7b3/re_buo_oko_3_04_12_2018.pdf. – Текст : электронный.

24. Георадары «Лоза» для подповерхностного зондирования и их применение / В. В. Копейкин, П. А. Морозов, А. В. Попов [и др.] // Фундаментальные космические исследования. Дистанционное зондирование Земли и планет : материалы Российско-Болгарской конференции, Болгария, Солнечный Берег (23–28 сентября 2008 г.).

25. Cook, J. C. Proposed monocycle-pulse VHF radar for airborne ice and snow measurement // Trans. Amer. IEE, pt. 1 / Commun. and Electronics. – 1960. – Vol. 79, № 51. – P. 588–594.

26. Geophysical Survey Systems, Inc. : [сайт]. – 2025. – URL : <http://www.geophysical.com> (дата обращения: 26.08.2013). – Текст : электронный.

27. Koden Electronics Co., Ltd. : [сайт]. – URL: <http://www.koden-electronics.co.jp/eng> (дата обращения: 30.08.2013). – Текст : электронный.

28. MALÅ GeoScience : [сайт]. – URL: <http://www.malags.com/home>. – Текст : электронный.

29. OYO Corporation : [сайт]. – URL: <https://www.oyo.co.jp/english/> (дата обращения 19.19.2025) .– Текст : электронный.

30. Radar Systems, Inc. : [сайт]. – URL: <http://www.radsys.lv> (дата обращения 19.19.2025). – Текст : электронный.
31. Saxton, I. A. Electrical properties of water // Wireless Engineer. – 1949. – Vol. 26, № 312.
32. Sensors & Software : [сайт]. – URL: <http://www.sensoft.ca>. – Текст : электронный.
33. Transient Technologies : [сайт]. – URL: <http://viy.ua>. – Текст : электронный.
34. Многофункциональный контрольно-индикационный прибор Пикор-Лёд : руководство по эксплуатации. – Москва, 2016. – URL: <https://uwbs.ru/wp-content/uploads/Руководство-по-эксплуатации-Пикор-Лед.pdf>. – Текст : электронный.
35. Lowy, H., Leimbach, G. Eine electrodynamische Methode zur Erforschung des Erdinneren (Zweite Mitteilung) // Phys. Zeitschrift. – 1912. – Bd. 13, № 9. – P. 397–404.
36. Annan, A. P. GPR – Trends, History, and Future Developments // Subsurface Sensing Technologies and Applications. – 2002. – Vol. 3, № 4. – 18 p.
37. Хмелевской, В. К. Возможности радиоволнового интерференционного зондирования по данным динамического моделирования двухслойных геоэлектрических сред / В. К. Хмелевской, Б. П. Петрухин // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2010. – № 1. – С. 50–54.
38. Ним, Ю. А. Импульсная электроразведка криолитозоны / Ю. А. Ним, А. В. Омельяненко, В. В. Стогний. – Новосибирск : Наука, 1994. – 88 с.
39. Мачерет, Ю. Я. Радиолокационное зондирование ледников Шпицбергена с вертолета / Ю. Я. Мачерет, А. Б. Журавлев // Материалы гляциологических исследований. – 1980. – Вып. 37. – С. 109–131.
40. Финкельштейн, М. И. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек и озер водохранилищ / М. И. Финкельштейн, Э. И. Лазарев, А. Н. Чижов – Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 117 с.
41. Matzler, C., Wegmuller, U. Dielectric properties of fresh-water ice at microwave frequencies // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1987. – Vol. 20. – P. 1623–1630.

42. Han, H., Li, Y., Li, W., Liu, X., Wang, E., Jiang, H. The influence of the internal properties of river ice on ground penetrating radar propagation // Water. – 2023. – Vol. 15, Is. 889.
43. Омельяненко А. В. Георадиолокационная технология определения параметров речного льда в период его формирования и половодья / А. В. Омельяненко, Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктике : труды междунар. научно-практ. конф. – Якутск, 2011. – Ч. 2. – С. 34–40.
44. Фёдоров, М. П. Исследование структуры речного льда методом георадиолокации / М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова, А. В. Омельяненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12. – С. 198–201.
45. Фёдоров, М. П. Методика георадиолокационных исследований ледяного покрова (на примере р. Лены на участке Табагинский мыс – Кангалацкий мыс) / / М. П. Фёдоров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 5. – С. 18–32.
46. Arcone, S. A., Delaney, A. J. Airborne river-ice thickness profiling with helicopter-borne UHF short-pulse radar // Journal of Glaciology. – 1987. – Vol. 33, № 115. – P. 330–340.
47. Annan, A. P., Davis, J. L. Impulse radar applied to ice thickness measurement, and freshwater bathymetry. – Geological Survey of Canada, Paper 77–1B, 1977. – P. 63–65.
48. Arcone, S. A. Radar profiling of ice thickness. – Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1985. – 11 p.
49. Arcone, S. A., Delaney, A. J., Perham, R. Short pulse radar investigations of fresh water ice sheets and brash ice. – CRREL Report, 1986. – P. 86–96.
50. Batson, G., Shen, H. T., Hung, S. Multi-year experience of remote sensing of ice thickness on the St. Lawrence River // Proceedings of the Eastern Snow Conference, 41st annual meeting, 1984.

51. Batson, G., Shen, H. T., Ruggles, R. Investigation of ice conditions in the St. Lawrence River, winter 1981–82. – Potsdam, NY: Clarkson College of Technology, 1984.
52. Forte, E., Dossi, M., Fontana, M. C., Colucci, R. R. 4-D quantitative GPR analyses to study the summer mass balance of a glacier: a case history // 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). 2014. – P. 352–356.
53. Ruols, B., Baron, L., Irving, J. Development of a drone-based ground-penetrating radar system for efficient and safe 3D and 4D surveying of alpine glaciers // Journal of Glaciology. – 2023. – Vol. 69, Is. 278. – P. 1–12.
54. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 году / Е. В. Василенко, А. Ф. Глазовский, Ю. Я. Мачерет [и др.] // Материалы гляциологических исследований. – 1999. – Вып. 90. – С. 86–99.
55. Beres, M., Haggenberger, P., Green, A. G., Horstmeyer, H. Using two- and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture // Sedimentary Geology. – 1999. – Vol. 129. – P. 1–2.
56. Мачерет, Ю. Я. Радиозондирование ледников / Ю. Я. Мачерет. – М. : Научный мир, 2006. – 392 с.
57. Zhao, W., Forte, E., Colucci, R., Pipan, M. High-resolution glacier imaging and characterization by means of GPR attribute analysis // Geophysical Journal International. – 2016. – Vol. 206, Is. 2. – P. 1366–1374.
58. Arcane, S. A. High resolution of glacial ice stratigraphy: a ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica // Geophysics. – 1996. – Vol. 61, № 6. – P. 1653–1663.
59. Forte, E., Dossi, M., Colucci, R. R., Pipan, M. A new fast methodology to estimate the density of frozen materials by means of common offset GPR data // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 99. – P. 135–145.
60. Glen, J. W., Paren, J. G. The electrical properties of snow and ice // Journal of Glaciology. – 1975. – Vol. 15, № 73. – P. 15–38.
61. Evans, S. Dielectric properties of ice and snow – a review // Journal of Glaciology. – 1965. – Vol. 5, № 42. – P. 773–792.

62. Дегазация земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал / В. И. Богоявленский, О. С. Сизов, И. В. Богоявленский [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2019. – № 4. – С. 52–68.
63. Владов, М. Л. Возможности георадиолокации при изучении гидрогеологических особенностей верхней части разреза / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов // Георадар в России – 2000 : тезисы докл. науч.-техн. конф., г. Москва, 15–19 мая 2000 г. – М., 2000. – С. 50–51.
64. Владов, М. Л. Георадиолокационные исследования на пресноводных акваториях / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов, А. Ю. Калашников // Инженерная геология. – М. : Инженерная геология, 2007. – С. 47–52.
65. Khristoforov, I. I., Danilov, K. P., Gorokhov, I. V. [et al.] GPR sounding of fossil mammoth bones from the surface of freshwater lakes and rivers // 17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2021, Gelendzhik, 26–30 апреля 2021. – Gelendzhik, 2021.
66. Moorman, B., Michel, F. Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground-penetrating radar // Journal of Paleolimnology. – 1997. – Vol. 18. – P. 61–73.
67. Карпов, Д. В. Георадиолокационные измерения на заболоченных территориях / Д. В. Карпов, С. П. Семенов // Вестник Югорского государственного университета. – 2012. – № 3 (26). – С. 66–70.
68. Родионов, А. И. Оценка возможностей георадиолокации при изучении сейсмогенных нарушений и деформаций в донных осадках (на примере озера Уполокшкое, северо-восток Фенноскандинавского щита) / А. И. Родионов, С. Б. Николаева, П. А. Рязанцев // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – № 4.
69. Применение георадиолокации в гидрологии / Н. Ю. Бобров, С. С. Крылов, Е. Ю. Киселев [и др.] // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 219–223.
70. Beres, M., Haeni, F. P. Application of ground-penetrating radar methods in hydrogeologic studies // Ground Water. – 1991. – Vol. 29, № 3. – P. 375–386.

71. Федорова, Л. Л. О возможности применения георадиолокации при подготовке и отработке дражных полигонов / Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 9. – С. 380–383.
72. Rodionov, A. I., Ryazantsev, P. A. GPR study of sapropel deposits in Karelian shallow water areas // Proceedings 17th international conference on ground penetrating radar, Rapperswil, 2018. – Р. 1–4.
73. Определение структуры ледяного покрова и параметров донных отложений озера Имандра методом георадиолокации / Ю. С. Новикова, П. А. Рязанцев, Ю. А. Дворников [и др.] // Труды КарНЦ РАН. – 2023. – № 6. – С. 1–29.
74. Новые данные по строению донных отложений и террас / Е. А. Константинов, Н. В. Карпухина, Е. В. Гаранкина [и др.] // Фундаментальные проблемы квартара, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований : материалы X Всероссийской конференции по изучению четвертичного периода. – М. : Изд-во ГЕОС, 2017. – С. 196–197.
75. Kopeikin, V. V., Kuznetsov, V. D., Morozov, P. A., Popov, A. V., Berkut, A. I., Merkulov, S. V. GPR inspection of the Chelyabinsk meteorite impact site at the Chebarkul Lake bottom // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. – Publisher: IEEE.
76. Nobes, D. C., Hammond, K. A., Bassett, K. N. Effect of suspended sediments on ground penetrating radar imaging of riverbeds // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018. – Publisher: IEEE.
77. Porsani, J. L., Moutinho, L., Assine, M. L. GPR survey in the Taquari River, Pantanal Wetland, West-Central Brazil // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2004. – Publisher: IEEE.
78. Huber, E., Anders, B., Huggenberger P. Quantifying scour depth in a straightened gravel-bed river with ground-penetrating radar // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018. – Publisher: IEEE.

79. Zhang, J.-S., Dong, Z.-H., An, Z.-M. Research on measurement of Kunming lake storage capacity with GPR // 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2012. – Publisher: IEEE.
80. Hugenschmidt, J., Mäder, A. GPR investigation of remains of pile dwellings in Lake Zurich // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018. – Publisher: IEEE.
81. Jol, H. M., Albrecht, A. Searching for submerged lumber with ground penetrating radar: Rib Lake, Wisconsin, USA // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2004.
82. Sensors & Software. pulseEKKO PRO 500 and 100 MHz Dual Channel SPIDAR : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sensoft.ca/case-studies/gpr-bathymetry-sub-bottom-profiling/>. – Текст : электронный.
83. Fu, H., Liu, Zh., Guo, X., Cui, H. Double-frequency ground penetrating radar for measurement of ice thickness and water depth in rivers and canals: Development, verification and application // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – Vol. 154. – P. 85–94.
84. Strock, T., Browne, T. Overview and comparison of nationwide underwater bridge inspection practices // Journal of the Transportation Research Board. – 2009. – № 2108. – P. 97–106.
85. Омельяненко, А. В. Результаты георадиолокации дна и донных отложений речных переходов линейных инженерных сооружений / А. В. Омельяненко, И. И. Христофоров // Наука и образование. – 2013. – № 1. – С. 38–43.
86. Христофоров, И. И. Возможности реализации двухспектральной георадиолокации при инженерных изысканиях на ВСТО / И. И. Христофоров // Эрэл–2007 : материалы конфер. науч. молодёжи, посвящ. 50-летию СО РАН (г. Якутск, 14–15 мая 2007 г.). – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 112–115.
87. Христофоров, И. И. Георадиолокационное 3D картирование донных отложений речных водоемов / И. И. Христофоров // XV Лаврентьевские чтения, посвящ. 300-летию со дня рождения М. В. Ломоносова (г. Якутск, 11–15 апр. 2011 г.). – Якутск, 2011. – С. 122–128.

88. Христофоров, И. И. Георадиолокационные исследования водоемов Якутии при решении инженерно-геологических задач / И. И. Христофоров // Эрэл-2011 : материалы Всероссийской конференции научной молодежи (г. Якутск, 24–29 окт. 2011 г.). – Якутск : Изд-во «Цумори Пресс», 2011. – Т. 1. – С. 241–242.
89. Христофоров, И. И. Георадиолокационные исследования речных переходов линейных инженерных сооружений // И. И. Христофоров // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире : материалы II-й Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых (г. Якутск, 24–25 мар. 2010 г.). – Якутск : Издательско-полиграфический комплекс СВФУ, 2010. – С. 177–180.
90. Христофоров, И. И. Дистанционный контроль качества укладки трубопроводов на речных переходах / И. И. Христофоров // Экология урбанизированных территорий. – 2013. – № 2. – С. 127–129.
91. Христофоров, И. И. Использование геофизических методов для контроля технологической безопасности эксплуатации подводного газопровода / И. И. Христофоров, К. И. Кайгородов // Безопасность горного производства в Республике Саха (Якутия) : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвящ. 70-летию д.т.н., проф. Е. Н. Чемезова. – Якутск : Изд-во Якутского гос. университета, 2008. – С. 76–78.
92. Христофоров, И. И. Обоснование эффективности использования георадиолокационного мониторинга при проектировании и эксплуатации нефте- и газопроводов на речных переходах / И. И. Христофоров // Эрэл-2009 : материалы конференции научной молодежи (г. Якутск, 1–3 дек. 2009 г.). – Якутск : Изд-во РИО «Феникс», 2009. – С. 151–155.
93. Xu, X., Wu, J., Shen, J., He, Z. Case study: Application of GPR to detection of hidden dangers to underwater hydraulic structures // Journal of Hydraulic Engineering-ASCE. – 2006. – Vol. 132.
94. Ruffell, A., Powell, N. Search strategy for buried objects in water: geophysics, probes and dogs // Forensic Sciences. – 2021. – Vol. 1. – P. 130–137.

95. Использование георадарных методов в палеонтологии на примере исследования мамонтовой фауны / С. П. Лукьянов, Р. А. Степанов, И. А. Черный [и др.] // Сборник научных трудов. Физико-математические и технические науки. – Сургут, 2007. – С. 46–54.
96. Керемясов, Н. В. Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости / Н. В. Керемясов // Прикладные исследования. Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле». – 2018. – № 2. – С. 5–18.
97. Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2025. – № 1. – С. 74–86.
98. Горохов, И. В. Картирование донных отложений реки Колыма методом георадиолокации при поиске ископаемой мамонтовой кости / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024 : материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия), Якутск, 26–29 марта 2024 года. – Новосибирск : ФГБУ «Сибирское отделение Российской академии наук», 2024. – С. 446–449.
99. Результаты поиска ископаемой мамонтовой кости на дне и в донных отложениях реки Колыма методом георадиолокации в зимний период / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов [и др.] // Арктика – территория стратегических научных исследований : сборник трудов II Арктического конгресса, Якутск, 20–22 сентября 2024 года. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, 2024.– С. 64–67.
100. Горохов, И. В. Предпосылки применения метода георадиолокации для обнаружения бивней мамонтов на дне пресноводных водоемов криолитозоны / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию

Академии наук Республики Саха (Якутия) и 40-летию геологоразведочного факультета СВФУ им. М. К. Аммосова, Якутск, 21–24 марта 2023 года. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, 2023. – С. 52–56.

101. Судакова, М. С. Влияние электропроводности на коэффициент отражения электромагнитной волны / М. С. Судакова, М. Л. Владов, М. Р. Садуртдинов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2018. – № 1. – С. 100–106.
102. Omelyanenko, A. V., Kaygorodov, K. I., Khristoforov, I. I., Lazareva, M. A. Experimental studies on determination of the snow cover density of reservoirs by remote GPR // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium. – 2014. – P. 192–195.
103. Узлов, В. А. Основные физические параметры снежного покрова / В. А. Узлов, Г. И. Шишков, В. В. Щербаков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 1. – С. 119–129.
104. Tiuri, M. E. The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies // IEEE J. Oceanic Eng., OE-9. – 1984. – P. 377–382.
105. Hallikainen, M., Ulaby, F. T., Abderazik, M. Measurements of the dielectric properties of snow in the 4–18 GHz // European Microwave Conference, Helsinki, Finland, 1982. – P. 151–156.
106. Гидрогеологические условия поймы Лены у города Якутска / Н. А. Павлова, В. В. Огонеров, М. В. Данзанова [и др.] // Криосфера Земли. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 35–44.
107. Донченко, Р. В. Ледовый режим рек СССР / Р. В. Донченко – Л. : Гидрометеоиздат, 1987. – 248 с.
108. Горохов, И. В. Оценка влияния сезонного льда и снега при георадиолокационном зондировании водных объектов суши на примере реки Лены / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Успехи современного естествознания. – 2025. – №8. – С. 56 – 63.

109. Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. – 2016. – Vol. 209. – P. 163–170.
110. Машков, В. Г. Оценка точности реконструкции электрофизических и геометрических параметров поляриметрическим методом многослойных диэлектрических сред / В. Г. Машков, В. А. Малышев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – № 9 (2).
111. Патент № 226629 U1 Российская Федерация, МПК G01V 3/15, G01S 13/88, H01Q 1/12. Платформа для антенного устройства георадара: № 2024110513: заявл. 17.04.2024: опубл. 14.06.2024 / И. И. Христофоров, И. В. Горохов, К. П. Данилов; правообладатель ФБГУН ИМЗ СО РАН.
112. Горохов, И. В. Особенности георадиолокации пресноводных водоемов с поверхности льда / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии : материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 150-летию и 100-летию со дня рождения ученых-мерзлотоведов Михаила Ивановича Сумгина и Кирилла Фабиановича Войтковского, Якутск, 27 июня – 07 июля 2023 года. – Якутск : ИМЗ СО РАН, 2023. – С. 17–19.
113. Горохов, И. В. Результаты физического моделирования георадиолокационного зондирования донных отложений пресноводных водоемов в зимний период / И. В. Горохов, И. И. Христофоров, К. П. Данилов // Электроразведка 2022 : сборник тезисов научно-практической конференции, Москва, 26–28 октября 2022 года. – Москва : Издательский дом «Академия Естествознания», 2023. – С. 169–176.
114. Особенности георадиолокации пресноводных водоемов криолитозоны в зимний период / И. И. Христофоров, К. П. Данилов, И. В. Горохов и [др.] // Георадар 2021 : сборник научно-практической конференции / под ред. М. С. Судаковой, М. Р. Садуртдинова. – М. : Издательский дом «Академия Естествознания», 2022. – С. 104–107.

115. Христофоров, И. И. Исследование влияния толщины льда на георадиолокацию донных отложений рек и озер в зимний период / И. И. Христофоров, К. П. Данилов, И. В. Горохов // Мониторинг в криолитозоне : Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов / под ред. Р. Г. Мотенко. – М., 2022. – С. 441–443.
116. Христофоров, И. И. Влияние торосов на точность георадарного определения толщины ледяного покрова реки / И. И. Христофоров, К. П. Данилов, И. В. Горохов [и др.] // Инженерная и рудная геофизика 2021 : материалы 17-й научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. – Москва : ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. – С. 169.
117. Markovaara-Koivisto, M., Hokkanen, T., Huuskonen-Snicker, E. The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2014. – Vol. 73. – P. 815–823.
118. Федоров, М. П. Оценка пространственной неоднородности ледяного покрова реки Лены методом георадиолокации / М. П. Федоров, Л. Л. Федорова, А. В. Омельяненко // Известия УГГУ. – 2019. – № 4 (56). – С. 74–78.
119. Бойцов, А. В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии : дис. к. г.-м. н. / А. В. Бойцов – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. – 176 с.
120. Строение осадочного чехла на пресноводных озерах полуострова Киндо вблизи Беломорской биологической станции МГУ по данным георадиолокации и бурения / А. В. Старовойтов, К. З. Валиуллина, А. Н. Ошкин [и др.] // Вестник Московского университета. – 2019. – № 6. – С. 87–99.
121. Arcone, S. A., Finnegan, D. C., Liu, L. Target interaction with stratigraphy beneath shallow, frozen lakes: Quarter-wave resonances within GPR profiles // Geophysics. – 2006. – Vol. 71, № 6. – P. K119–K131.
122. Ермаков, А. П. Георадиолокационные исследования верхней части разреза при проектировании сейсмических работ в зимнее время / А. П. Ермаков,

А. В. Старовойтов, М. Л. Владов // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 2. – С. 89–97.

123. Анисимова, Н. П. Гидрогоеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии : монография / Н. П. Анисимова, Н. А. Павлова – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2014. – 189 с. – ISBN 978-5-906284-56-3.

124. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных : учебное пособие / А. В. Старовойтов. – М. : Изд. Моск. ун-та, 2008. – 192 с.

125. Возможности георадиолокации при изучении четвертичных отложений в озерах Карелии / А. В. Старовойтов, М. Ю. Токарев, А. Л. Марченко [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. – 2016. – № 5. – С. 62–75.

126. Строение четвертичных отложений в долине верхнего Днепра по данным изучения комплексом геофизических методов / С. С. Бричева, И. Н. Модин, А. В. Панин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2020. – № 3. – С. 104–115.

127. Рельеф, строение и возраст четвертичных отложений долины р. Лены в Якутской излучине / С. А. Правкин, Д. Ю. Большиянов, О. А. Поморцев [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 209–229.

128. Банщикова, О. И. Склоновые процессы на Бестяхской террасе в местности Улахан-Тарын / О. И. Банщикова, В. Ф. Попов // Вестник СВФУ. 2007. – № 1. – С. 28–32.

129. Смирнов, А. Н. Геологические предпосылки поисков подводных скоплений мамонтовых бивней методом гидролокации в российской Арктике / А. Н. Смирнов, К. К. Калиновский // Арктика: экология и экономика. 2020. – № 2. – С. 86–96.

130. Смирнов, А. Н. Ресурсный потенциал ископаемой мамонтовой кости в Российской Арктике / А. Н. Смирнов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 4. – С. 21–29.

131. Кириллин, Н. Д. Ископаемая мамонтовая кость -особый природный ресурс / Н. Д. Кириллин, Р. Р. Ноговицин // Наука и техника в Якутии. – 2010. – 1 (18). – С. 19–23.