

На правах рукописи

Горохов Иван Викторович

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

Специальность 1.6.7 – инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Якутск
2026**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки ФИЦ «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук, в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте мерзлотоведения им П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Христофоров Иван Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии ИМЗ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Гриб Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Технического института (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова».

Сергеев Дмитрий Олегович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геокриологии им. Г.З. Перльштейна, ФГБУН Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита диссертации состоится 18 марта 2026 г. в 14-00 ч. на заседании диссертационного совета 24.1.076.01 при ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН по адресу: 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (<http://mpi.ysn.ru>).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36 и на e-mail: aashest@mail.ru.

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат географических наук

Шестакова
Алёна Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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 таких исследований в значительной мере зависит от корректности выбора методики и точностью используемых инструментальных средств.

Георадиолокация в данной области обладает возможностью решения задач в сложных условиях, таких как, заболоченная местность, наличие мерзлого слоя, ограниченное пространство и т.д. Однако, в контексте использования георадиолокации на водных объектах с поверхности сезонно-мерзлого покрова, необходимо выделить ряд факторов, ограничивающих эффективность метода таких, как ограничение глубины зондирования, снижение разрешающей способности, а также высокая зависимость качества регистрируемых данных от источников помех, находящихся в мерзлом массиве.

В системе водных объектов, в зимний период наиболее сложное строение имеют объекты, расположенные в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород. Поскольку, большинство рек и озёр криолитозоны начинают промораживаться в середине октября и остаются в ледяном покрове более 6 месяцев в году. При этом мощность и строение льда меняются в течение всего холодного периода. В связи с этим, в регионах с ранним ледоставом и длительным зимним периодом, особенно актуален вопрос совершенствования приемов и подходов зимней георадиолокации, учитывающих оптимальные условия проведения исследований, их проектирования и выполнения без существенного снижения эффективности метода в сравнении с результатами, полученными с водной поверхности.

Степень разработанности темы. Исследований, направленных на применение георадаров для изучения строения дна и донных пород с поверхности льда, сравнительно немного. В трудах Arccone S., Finnegan D., Хаптанова В.Б., Башкуева Ю.Б., Дембелов М.Г., Родионова А.И., Рязанцева П.А. описаны результаты, где помимо исследований толщины и структуры льда, также были определены границы дна и строение донных отложений. Moortman B. и Michel F. 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.

Однако, несмотря на имеющийся опыт применения метода георадиолокации для изучения водных объектов, в научной литературе пока не сформирована единая система методических подходов и рекомендаций, обеспечивающих воспроизводимость и сопоставимость результатов, полученных в разные сезоны работы.

Цель работы – оценить влияние параметров снежно-ледового 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. Аналитический обзор современных методов и технических средств георадиолокационных исследований водных объектов криолитозоны с поверхности льда и выявление факторов, ограничивающих 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.

Объект исследования: распространение электромагнитных волн на водных объектах с сезонно-мерзлым покровом

Предмет исследования: изучение закономерностей, связывающих мощность снежно-ледяного покрова с амплитудными характеристиками георадарного сигнала.

Методика исследований. Исследования базируются на использовании георадиолокационной аппаратуры ОКО-3 с широкополосными антennами АБ-150, 250, 400 МГц. Натурные исследования проводились на участках рек Лены и Колымы, а также на озерах Центральной Якутии. Поставленная задача по физическому моделированию с воздуха на разных высотах решалась с помощью разработанного антенного устройства, выполненного из радиопрозрачных материалов.

Научные результаты, 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. Разработан 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.

Научная новизна

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 наблюдается уменьшение уровня 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 антennaя платформа, позволяющее повысить качество данных, за счет уменьшения погрешности при регистрации донных отложений пресноводных водоёмов с поверхности льда.

2. Обоснована методика 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.

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

Апробация работы. Результаты исследований апробированы на 14 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 – онлайн участие; 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.

Публикации. Автором опубликовано 15 научных работ. По материалам диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и 2 патента.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается результатами численного моделирования и большим объемом экспериментальных и натурных измерений. Все исследования, описанные в диссертационной работе, выполнены современным оборудованием с применением разработанной методики исследований и данными контрольного бурения льда.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 131 наименований. Общий объем работы включает 137 страниц машинописного текста, 10 таблиц, 40 графических иллюстраций.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю к.т.н., ведущему научному сотруднику ИМЗ СО РАН Христофорову И.И. за постановку темы исследования и заданию нужного направления работы. Также автор признателен младшему научному сотруднику ИМЗ СО РАН Данилову К.П., за ценный опыт и помошь в проведении экспериментальных полевых работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, подчеркнута ее значимость в контексте геокриологических и инженерных задач. Сформулированы цель и задачи исследования.

Первая глава диссертации посвящена анализу теоретических основ метода георадиолокации и опыта его применения в исследованиях дна и донных отложений в условиях развития ледяного покрова. В главе выделены основные факторы, ограничивающие эффективность метода в зимний период, проявляющиеся в виде модификации формы и энергии георадарного сигнала под влиянием снежно-ледяного покрова. Хотя снег и лед характеризуются низкой проводимостью и должны быть идеальными диэлектрическими средами, их динамичная внутренняя структура, формирующаяся на протяжении всего холодного периода, может существенно влиять на качество регистрируемых данных (Финкельштейн, 1994). Значительные потери энергии электромагнитной волны происходят также на границе раздела «лед–вода» и в толще водной среды, где затухание нарастает экспоненциально с увеличением глубины (Владов, 2005).

Литературный обзор показал, что метод георадиолокации получил широкое применение в исследованиях ледниковых систем и структуры ледяного покрова, поскольку лед представляет собой благоприятную среду для распространения электромагнитных волн с минимальным затуханием (Acrone, 1987; Forte, 2014; Федоров, 2022). Применение метода в изучении дна и донных отложений водных объектов в условиях сезонного оледенения описано в работах Владова М.Л., Старовойтова А.В., Moorman B., Michel F., Рязанцева П.А. и других исследователей.

Критический анализ источников показал, что применение георадиолокации для исследования дна со льда остается слабо разработанной областью, поскольку не существует общепринятых сформулированных методик или рекомендаций по применению метода георадиолокации при исследовании донных отложений рек и озер с ледяного покрова. Имеющийся опыт требует систематизации, обобщения и дополнения новыми результатами.

Во **второй главе** представлены результаты комплекса аналитических расчетов, натурных экспериментов и численного моделирования. Каждый из подходов учитывал изменение мощности сред пресноводного объекта с сезонным покровом в течение холодного периода.

Георадиолокационное зондирование водных объектов в зимний период представляет собой сложное взаимодействие и распространение электромагнитных волн через систему сред, с различными электрофизическими и геометрическими параметрами. При условии, что каждый слой можно рассматривать как однородную изотропную среду, эффективность зондирования определяется диэлектрической проницаемостью, электропроводностью, мощностью среды и центральной частотой сигнала. Амплитуда плоской волны на выходе из каждой среды рассчитывается по формуле: (E_h):

$$E_h = E_0 * \text{коэффициент затухания} \quad (1)$$

где E_0 – это амплитуда сигнала в начале распространения, множитель – отражает потери с коэффициентом затухания α в слое толщиной h .

В результате аналитических расчетов установлено, что наиболее значительное ограничение, вызванное ледяным покровом связано с отражением 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).

Роль мощности снега и льда определяется воздействием на распределение энергии в направлении зондирования. 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. Таким образом, расчёт вертикальной разрешающей способности показал, что при мощности льда более 0,28 м возникает условие, при котором большая часть спектра сигнала будет терять энергию на границе лед - вода.

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.

На рисунке 1 представлены радарограммы, полученные в ходе натурного эксперимента тремя антеннами в разные промежутки зимнего

периода. Радарограммы демонстрируют различную эффективность в условиях изменяющейся толщины льда. На речном участке глубиной 5 м антенны АБ-150 и АБ-250 МГц успешно регистрировали рельеф дна. Антенна 150 МГц показала наибольшую информативность о строении донных отложений. С увеличением толщины льда возрастает уровень помех в виде множественных переотражений от покрова и рассеяния на структурных неоднородностях ледяного массива. Антенна АБ-400 МГц продемонстрировала низкую эффективность для исследований дна с поверхности льда и не рекомендуется для этих целей.

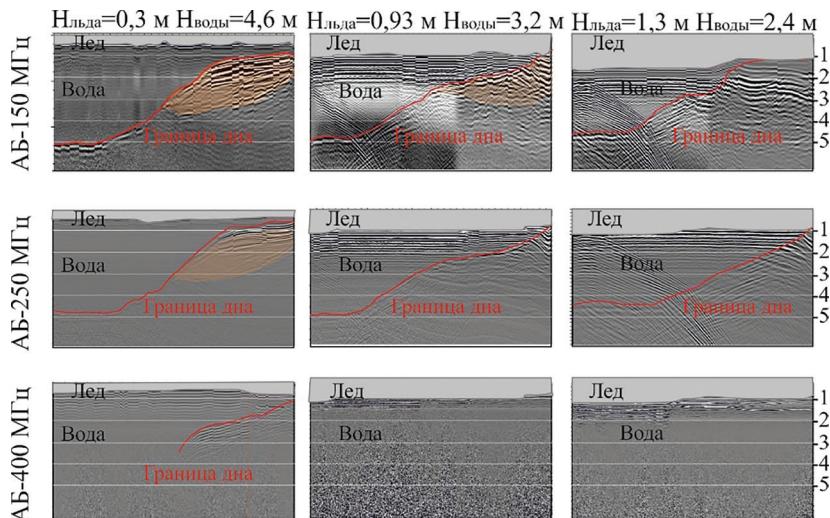


Рисунок 1 – Сравнение радарограмм антенн АБ-150, 250 и 400 МГц при разных мощностях льда и воды

Качественное сравнение результатов зондирования антенн АБ-150 МГц и АБ-250 МГц приводит к выводу о приоритете использования антенны АБ-150 МГц для более глубинных исследований донных отложений пресных водных объектов в условиях наличия сезонно-мерзлого покрова.

В результате аналитических решений и натурных наблюдений получены результаты, установившие определенные закономерности влияния толщин снежного и ледяного покровов. Однако, полученные данные ограничены числом фактических наблюдений и конкретными условиями

формирования льда и накопления снега. В связи с чем, для обобщения результатов и обоснования оптимальных параметров георадарных исследований использовано численное моделирование георадарного сигнала на программном комплексе gprMax.

Так, на рисунке 2 представлены результаты численного моделирования георадарных сигналов для антенны с центральной частотой 150 МГц при различных толщинах ледяного покрова и соответствующим им глубинам 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).

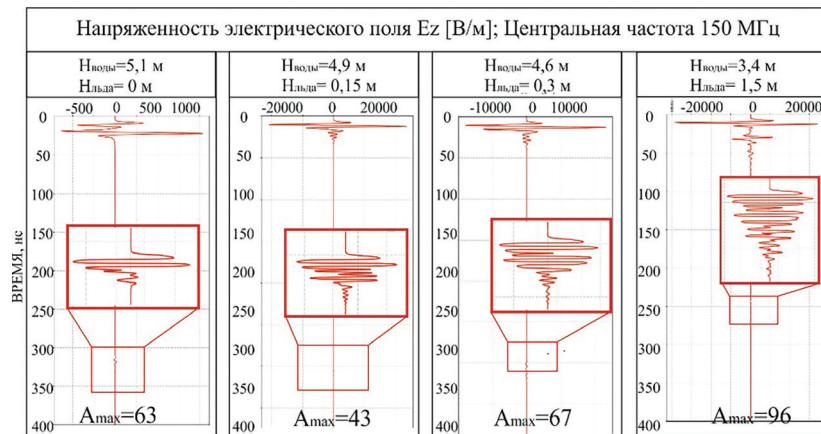


Рисунок 2 – Результаты численного моделирования георадарного сигнала с центральной частотой 150 МГц

Анализ амплитудных значений выявил сложное поведение отражённого сигнала с изменением толщины льда. При отсутствии льда амплитуда сигнала от границы дна составила 63 условные единицы. При увеличении толщины льда до 0,15 м наблюдается резкое падение амплитуды до значения 46 единиц. При дальнейшем утолщении ледяного покрова амплитуда начинает увеличиваться и максимальное значение 96 единиц достигается при толщине 1,5 м.

На рисунке 3 представлены графики, отражающие 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 натурными и модельными данными демонстрирует адекватность применённого численного подхода для описания физических процессов, происходящих при распространении электромагнитных волн в условиях ледяного покрова над водным слоем.

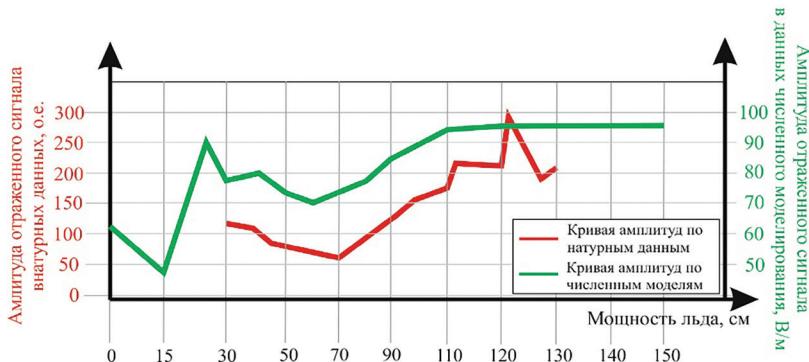


Рисунок 3 – Графики амплитуд отраженного сигнала на границе дна, АБ-150 МГц

В совокупности, полученные результаты показали, что при толщине льда свыше 0,25 м потенциальный выигрыш в амплитуде сигнала от дна компенсируется качественным ухудшением результатов и снижением надёжности интерпретации. Поэтому для антennы с центральной частотой 150 МГц оптимальным следует считать диапазон толщин льда до 0,25 м, который обеспечивает приемлемую глубинность при сохранении достаточной разрешающей способности.

Третья глава содержит результаты натурного моделирования георадиолокации донных отложений с поверхности льда и снега с применением разработанной антенной установки, позволяющей изменять высоту антенного блока над поверхностью. Наблюденные результаты раскрывают и обосновывают использование антенной установки для повышения эффективности приема полезных отраженных сигналов.

В результате эксперимента на реке Лене, установлена зависимость амплитуд отраженных сигналов от мощности сред: воздух, снег, лёд и вода. По качественным признакам однозначно установлено снижение влияния помех при наличии снежного покрова, создающего дополнительное расстояние между антенным блоком и поверхностью льда. Тогда, при условии, что диэлектрическая проницаемость сухого снега (1.2) и воздуха (1), то подъем антенны над чистым льдом будет снижать амплитуду помех и отраженного сигнала.

Таким образом, одной из задач натурного моделирования на реке Лене, являлось определение оптимальных положений антенных блоков с различной частотой, при которых будет увеличиваться соотношение значений полезного сигнала к помехе (рисунок 4).

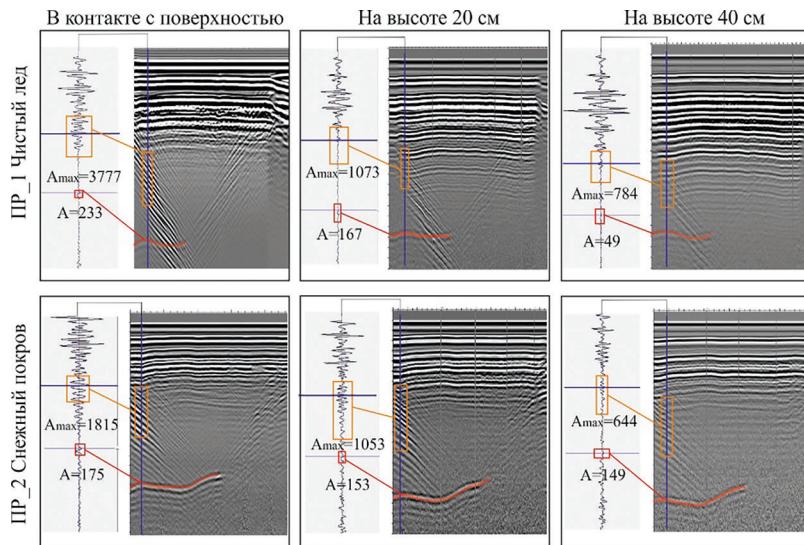


Рисунок 4 – Результаты подъема антенны АБ-150 МГц над поверхностью профилей

В результате качественной и количественной оценки зарегистрированных данных на примере, представленном на рисунке 4, можно определить характер изменения амплитуды помехи и полезного сигнала при подъеме антенны. 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, выполненном с поверхности снежного покрова.

На рисунке 5 представлены графики, построенные по значениям соотношений амплитуды полезного сигнала к амплитуде помехи. 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 пре-восходство значений помех на данных, полученных без снежного покрова. При симуляции его наличия путем поднятия антенны, наблюдается значительное снижение амплитуд.

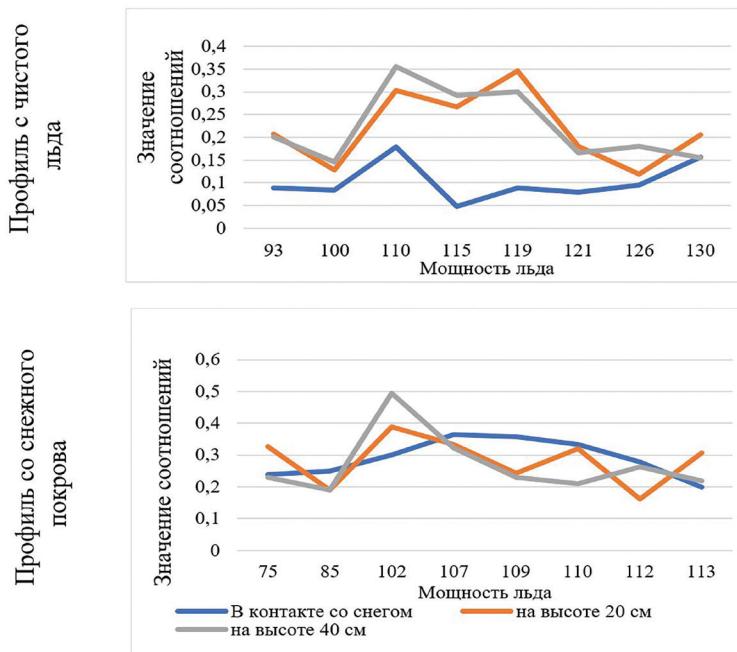


Рисунок 5 – Изменение соотношения амплитуд в зависимости от мощности льда и высоты антенны на профиле со снежным покровом

В результате анализа графиков можно отметить, что на чистом льду при прямом контакте значения сигнала остаются минимальными. Подъём антенн улучшает качество регистрации. Оптимальная высота составляет 0,4 м при толщине льда до 1,15 м. При большей толщине эффективнее положение 0,2 м.

Снежный покров создаёт более благоприятные условия. Благодаря переходному слою снега, при контакте с поверхностью соотношение сигнал/помеха превышает значения на чистом льду. Кривая характеризуется плавным изменением без резких провалов. Подъём антенн также увеличивает значения и формирует локальные максимумы.

Таким образом, однозначно установлено снижение влияния сигнала помехи при увеличении расстояния между антенным блоком и поверхностью исследования.

Четвертая глава содержит результаты апробации методических подходов, выявленных в результате натурных экспериментов. Разработаны критерии для оценки перспективности участков акваторий для добычи бивней мамонта, основанные на анализе донных отложений.

Для обоснования эффективности метода в определении морфологических особенностей водных объектов, характерных для костеносных участков и для поиска самой мамонтовой кости, проведены натурные исследования на среднем течении реки Колымы.

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 термоэрэзационных процессов, которые создают сложный микрорельеф и формируют залежи рыхлых осадков.

На рисунке 6 представлена план-схема исследованного участка, построенная по данным георадиолокации. На карте отмечены ключевые признаки для оценки наличия потенциальных подводных скоплений ископаемой мамонтовой кости.

Обоснование критерии для оценки перспективности донных отложений связано с предположительным характером накопления костных остатков при их выпадении из разрушающихся в результате термоэрэзационных процессов береговых склонов, сложенных едомными отложениями. Костный объект, высвобождаясь из оттаявших пород постепенно опускается на дно, задерживаясь на естественных выступающих препятствиях.

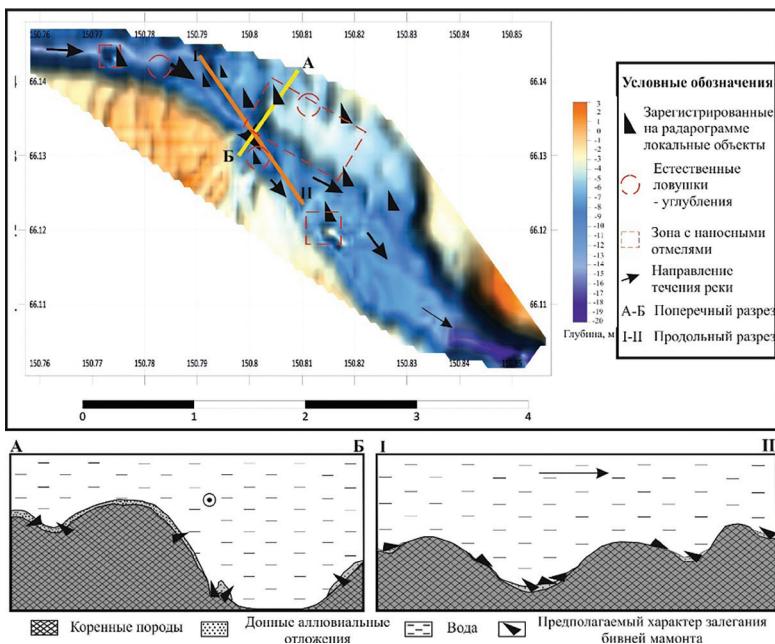


Рисунок 6 – План-схема участка с распределением глубин и выделенными перспективными участками для поиска бивней мамонта

Исследования с поверхности льда и снега позволяют проводить площадные измерения с наименьшим шагом для детального анализа морфологических признаков и непосредственного поиска локальных объектов. Глубинность исследований со льда с мощностью в среднем 150 см составила 12 м (рисунок 7). 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. На радарограммах фиксировались русловые образования, такие как протоки, старицы, эрозионные уступы и подводные гряды.

Аллювиальные отложения в виде повышений в рельефе, также способствуют сохранению костных остатков благодаря их способности защищать находки от эрозии и размыва. Отложения, представленные на рисунке 7 (а) и формирующиеся в условиях интенсивной гидродинамики, представляют

интерес для целенаправленного поиска скоплений костей. Использование комплекса водолазного оборудования и георадара позволило идентифицировать ряд находок, включая зуб мамонта (рисунок 7 (б)).

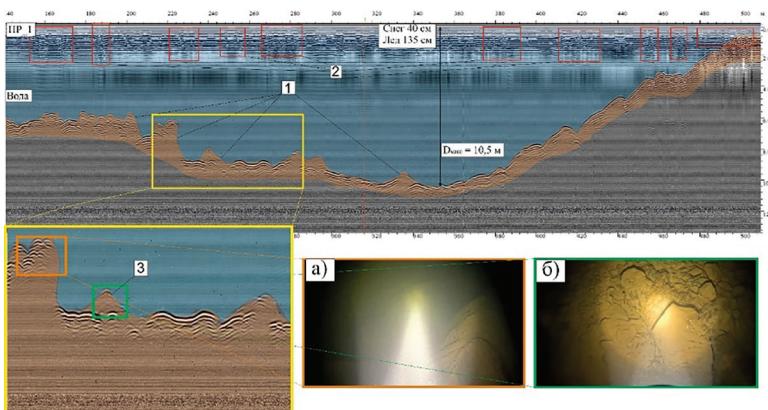


Рисунок 7 – Радарограммы на перспективном участке
1 – отраженные сигналы, идентифицированные как локальные объекты;
2 – потенциальные участки с нарушенными донными отложениями и
подводными завалами деревьев

Таким образом, 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.

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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих изданиях:

В научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, патенты:

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, Е. С. Петухова // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2025. – Т. 71, № 1. – С. 74–86. – <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>.
3. Патент на полезную модель № 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 на изобретение № 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, Е. А. Нестерова, И. В. Горохов, К. П. Данилов, Г. Г. Боскоров, А. В. Протопопов, В. М. Лыткин // Природа. – 2023. – № 7 (1295). – С. 3–19. – DOI 10.7868/S0032874X23070013.
2. Особенности георадиолокации пресноводных водоемов криолито-зоны в зимний период / И. И. Христофоров, К. П. Данилов, И. В. Горохов [и др.] // Георадар 2021 : Сборник тезисов научно-практической конференции в смешанном онлайн-оффлайн формате, Москва-Тюмень, 29 сентября – 01 октября 2021 года / под редакцией М. С. Судаковой, М. Р. Садуртдинова. – Москва : 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, Москва, 14–17 июня 2022 года / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – Москва : «КДУ», «Добросвет», 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 Колыма 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. Колыма / Е. С. Петухова, И. И. Христофоров, К. П. Данилов, **И. В. Горохов**, М. Ю. Чепрасов, Я. А. Михайлов // 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. 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, Е. С. Петухова // 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.

Горохов Иван Викторович
ВЛИЯНИЕ СНЕЖНО-ЛЕДОВОГО ПОКРОВА
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ ПРЕСНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ЯКУТИИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ИД 05324 от 09 июля 2001 г. Подписано в печать 13.01.2026.
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,3.
Уч.-изд. л. 1,09. Тираж 100 экз. Заказ №1.

Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения
им. П.И. Мельникова СО РАН
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН