

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»  
Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



**Прудецкий Николай Дмитриевич**

**МЕТОДИКА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО КАРТИРОВАНИЯ  
НЕЗАТРОНУТЫХ ТЕРМОКАРСТОМ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ  
РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ**

Специальность: 2.8.6. – «Геомеханика, разрушение  
горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
К. О. Соколов

Якутск – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

с.

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Аналитический обзор результатов исследований строения мерзлых рыхлых отложений россыпных месторождений алмазов криолитозоны.....	11
1.1 Горно-геологические и горнотехнические условия россыпных месторождений алмазов.....	11
1.2 Электрические и физико-механические свойства горных пород рыхлых отложений россыпных месторождений субарктической зоны...	21
1.3 Современное состояние геофизических исследований подземных льдов.....	30
Выводы, цель и задачи исследований.....	38
2 Особенности распространения высокочастотной электромагнитной волны в массиве горных пород с включением ПЖЛ.....	39
2.1 Физико-геологическая модель массива мерзлых горных пород с включением льда.....	39
2.2 Математическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением льда.....	49
2.3 Физическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением льда.....	64
Выводы.....	71
3 Методика георадиолокационного исследования повторно-жильных льдов незатронутых термокарстом в мерзлых рыхлых отложениях криолитозоны.....	73
3.1 Обоснование выбора аппаратуры и параметров проведения полевых георадиолокационных измерений.....	73
3.2 Обработка и интерпретация данных георадиолокации массива горных пород с включением льда.....	81
3.3 Апробация методики георадиолокационных исследований ПЖЛ на	

участке прииска «Молодо».....	89
Выводы.....	92
4 Результаты георадиолокационных исследований строения массива мерзлых горных пород с включением ПЖЛ на россыпных месторождениях алмазов криолитозоны .....	93
4.1 Обнаружение и оконтуривание ПЖЛ при оценке горно-геологических условий месторождений криолитозоны (на примере участков «Новогодний» и «р. Куоллээх»).....	93
4.2 Результаты георадиолокационных исследований ПЖЛ на буровзрывных блоках прииска «Маят».....	98
4.3 Картирование кровли ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород на прииске «Молодо».....	108
Выводы.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	116
Приложение А .....	131

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Для эффективного ведения горных работ, необходима точная и надежная информация о горно-геологических и горно-технических условиях массива горных пород разрабатываемых месторождений. При производстве вскрышных работ на россыпных месторождениях криолитозоны часто (в зимний период) требуется буровзрывная подготовка торфов к выемке. Наличие в составе вскрышных пород (торфов) повторно-жильных льдов, не прослеживаемых визуальными термокарстовыми проявлениями, существенно снижает эффективность буровзрывных работ. Проектирование массовых взрывов без учёта различия физико-механических свойств горных пород и льда приводит к снижению качества дробления вплоть до выхода негабаритов. В частности, подобные горно-геологические условия разработки характерны для алмазосодержащей россыпи Западной Якутии, разрабатываемой АО «Алмазы Анабара».

Обзор ранее проведенных геокриологических исследований россыпных месторождений алмазов криолитозоны показывает, что прослеживаемые в теле россыпи (торфах) повторно-жильные льды (ПЖЛ), как правило, существенно не затронуты термокарстом. Они слабо выражены в рельефе и их наличие, практически, невозможно фиксировать на аэрофотоснимках, что затрудняет выявление и картирование ПЖЛ для планирования и эффективного ведения буровзрывных работ (БВР).

Для решения этой проблемы предлагается использование геофизических методов исследований массива горных пород в части выявления и картирования ПЖЛ. Опыт эксплуатационной разведки россыпных месторождений алмазов подтвердил, что метод георадиолокации является наиболее эффективным геофизическим методом для изучения мерзлых рыхлых отложений на глубину до 30 м, что подтверждается исследованиями М. И. Финкельштейна, В.В. Богородского, А.В. Омеляненко, М.Л. Влагова, А.В. Старовойтова, Л.Л. Федоровой, Л.Г. Нерадовского и др. Однако при определении

местоположения повторно-жильного льда в массиве мёрзлых горных пород методом георадиолокации существует проблема однозначной интерпретации данных, так как ПЖЛ отображается на георадиолокационной волновой картине так же, как и некоторые другие неоднородности массива горных пород.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование методических подходов к обработке георадиолокационных данных, позволяющих однозначно определять наличие ПЖЛ и повышающих качество георадиолокационного изучения строения массива горных пород россыпных месторождений алмазов криолитозоны, является актуальными.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами изучения повторно-жильных льдов в массиве мёрзлых горных пород на Северо-Западе Якутии занимались многие ученые, применяя при этом различные методы исследования. Анализ работ А.Ю. Деревягина, С.Н. Булдовича, С.Ф. Хруцкого, Ю.К. Васильчука, В.Н. Конищева, Е.М. Катасонова, В.В. Куницкого и др. показал, что в большинстве случаев изучение ПЖЛ производилось на основе оценки обнажений и керна скважин. Методы геофизики применялись для исследования различных видов подземных льдов, например, изучение бугров пучения (линз подземного льда) проводилось методами электромагнитной индукции (Л.Г. Нерадовский), вертикального электрического зондирования (Д.В. Котелевец, К. Yoshikawa) и георадиолокации (А.П. Ермаков, А.В. Старовойтов, Т. Kohout). С помощью метода георадиолокации проводились опытно-методические работы по выявлению пластовых льдов (А.В. Омеляненко, К.О. Соколов), повторно-жильных льдов, расположенных под палеоруслами на севере Канады (М. Allard), полигонально-жильных льдов затронутых термокарстом (С.С. Бричева). Таким образом, методы геофизики успешно применяются для изучения некоторых видов подземных льдов, однако в настоящее время не проводились исследования по выявлению незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород и, соответственно, слабо выраженных в рельефе местности.

Работа выполнена в Институте горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГДС СО РАН) в соответствии с планом НИР: проект «Исследование и разработка эффективных конструктивных и технологических параметров подземной и открытой геотехнологии, методов освоения недр криолитозоны» (№ 0382-2018-0001).

**Объект исследования:** многолетнемёрзлый массив горных пород россыпных месторождений алмазов с включениями ПЖЛ.

**Предмет исследования:** георадиолокационное волновое поле, сформированное в массиве горных пород, содержащем незатронутый термокарстом ПЖЛ.

**Идея работы:** заключается в использовании комплексного анализа спектральных и динамических характеристик сигналов, образующих георадиолокационное волновое поле, для выявления и картирования повторно-жильных льдов в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны.

**Цель работы** разработать методику, позволяющую выявлять и картировать ПЖЛ в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны методом георадиолокации.

**Основные задачи работы:**

- 1) выполнить аналитический обзор результатов исследований строения мерзлых рыхлых отложений россыпных месторождений криолитозоны;
- 2) создать физико-геологическую модель массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ на основе компьютерного и физического моделирования георадиолокационных измерений;
- 3) обосновать георадиолокационные признаки выявления незатронутых термокарстом ПЖЛ в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны;
- 4) разработать методику картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород методом георадиолокации;
- 5) апробировать разработанную методику при эксплуатационной разведке россыпных месторождений криолитозоны.

**Методы исследований:** аналитический обзор литературных источников, компьютерное и физическое моделирование, натурные экспериментальные исследования, статистическая и аналитическая обработка результатов экспериментальных исследований, интерпретация данных георадиолокации.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Георадиолокационное изучение незатронутого термокарстом повторно-жильного льда (ПЖЛ) в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны обеспечивается совместным учётом спектральных и динамических характеристик сигналов, образующих георадиолокационное волновое поле, содержащее две гиперболические оси синфазности сигналов, отражённых от верхней и нижней границ ПЖЛ и характеризующееся изрезанной формой Фурье-спектра.

2. Разработанная методика георадиолокационного исследования массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, отличающаяся использованием дискретного преобразования Фурье в оконном режиме и зависимости уменьшения амплитудных значений сигналов за время прохождения в ПЖЛ, позволяет проводить выявление и картирование незатронутых термокарстом ПЖЛ в рыхлых отложениях, а, следовательно, повысить детальность и эффективность исследований при проведении вскрышных работ буровзрывном способом.

**Научная новизна:**

1. Разработана физико-геологическая модель массива горных пород криолитозоны с включением повторно-жильного льда;

2. Обоснована достаточность совместного анализа спектральных и динамических характеристик сигналов для выявления незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве горных пород криолитозоны методом георадиолокации;

3. Определены особенности спектральной характеристики (изрезанная форма Фурье-спектра) и структурные элементы георадиолокационного волнового поля (две гиперболические оси синфазности сигналов с противоположными

фазами), получаемого при наличии в массиве горных пород криолитозоны объектов с ПЖЛ-подобной формой;

4. Установлена линейная зависимость затухания ( $r$ ) амплитуды георадиолокационных сигналов от времени прохождения ( $\Delta t$ ), характеризующая электрофизические свойства ПЖЛ.

5. Разработана методика картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, отличающаяся комплексным анализом спектральных и динамических характеристик георадиолокационных сигналов.

**Достоверность полученных результатов исследования** подтверждается результатами компьютерного и физического моделирования, и результатами обширных экспериментальных и полевых измерений, полученных с применением разработанной методики исследований, обработкой и интерпретацией данных георадиолокации, подтвержденных данными бурения и проходкой шурфов.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности использования полученной информации на стадии эксплуатационной разведки месторождений россыпных алмазов криолитозоны для выявления и картирования ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород, что весьма важно для эффективного ведения буровзрывных работ при вскрыше торфов.

**Личный вклад автора** состоит в проведении компьютерного и физического моделирования распространения георадиолокационных сигналов в мёрзлом горном массиве с включением ПЖЛ, разработке алгоритма обработки георадиолокационных данных, в обработке и интерпретации данных георадиолокационных исследований, разработке методики выявления и картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, и апробации разработанной методики на россыпных месторождениях алмазов криолитозоны «уч. Эбелях-Гусиный», «уч. Новогодний» (р. Маят) и на прииске «Молодо» (р. Молодо).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы представлялись на 20 научных конференциях разного уровня, в том числе на: 17th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Institute of Electrical and



Electronics Engineers Inc. on 18-21 June 2018. – (Switzerland, Rapperswil, 2018); Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка» - (г. Москва, 2018, 2020, 2023, 2024); XI International symposium on Permafrost Engineering Magadan (Russia) – 2017 (Magadan, 2017); VII International Conference on Cryopedology Cryosoils in Perfective: A View From the Permafrost Heartland on 21-28 august 2017. – (Yakutsk, 2017); Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2016); VI научно-практической конференции и выставке геофизического оборудования и программного обеспечения «ГЕОРАДАР - 2023» (22-24 марта 2023, г. Москва), Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России» (г. Якутск, 2013, 2014, 2016, 2018, 2022, 2023); Всероссийской научно-практической конференции посвященной памяти чл.-корр. РАН М.Д. Новопашина «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, 2015, 2019, 2021); Научной конференции молодых ученых и специалистов ИГДС СО РАН «Проблемы горной науки: взгляд молодых ученых» (г. Якутск, 2013, 2014).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 11 печатных работах, в том числе 4 статьях, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК России и 1 программе для ЭВМ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 110 наименований и 1 приложения. Объем рукописи составляет 131 страницу машинописного текста, 9 таблиц, 41 рисунок.

Автор высоко ценит вклад своего научного руководителя к.т.н. К.О. Соколова в постановку исследовательской темы, а также его постоянное внимание и дискуссии о достигнутых результатах. Также автор выражает глубокую благодарность к.т.н. Л.Л. Федоровой за ценные советы в ходе подготовки диссертации. Большая признательность также адресована сотрудникам лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН и коллективу

геофизического отдела АО «Алмазы Анабара» за поддержку в проведении экспериментальных и полевых исследований.

## 1 Аналитический обзор результатов исследований строения мерзлых рыхлых отложений россыпных месторождений алмазов криолитозоны

Россыпные месторождения алмазов Якутии разрабатываются в основном открытым способом, при этом для подготовки россыпного месторождения к разработке предварительно удаляют пустые породы (торфа), покрывающие пласт с полезным ископаемым (пески). Учитывая особенности залегания россыпных месторождений в условиях криолитозоны, технология проведения добычных работ полезного ископаемого тесно связана в первую очередь со сложностью горно-геологических и горнотехнических условий их разработки.

### 1.1 Горно-геологические и горнотехнические условия россыпных месторождений алмазов

В Республике Саха (Якутия) алмазодобывающая промышленность является основной бюджетобразующей отраслью, играющая ведущую роль в экономике региона. Однако в связи с переходом на менее производительную и затратную подземную разработку главной алмазодобывающей компании «АЛРОСА» на основных разрабатываемых коренных месторождениях алмазов для сохранения ранее достигнутого объема производства алмазного сырья в республике становится актуальной разработка новых россыпных месторождений алмазов, которые расположены в основном на территории Анабарского и Прианабарского регионов, занимающих северо-восточную часть Сибирской платформы [1].

Многие россыпные месторождения алмазов криолитозоны относятся к аллювиальному типу. Четвертичные образования широко распространены, представлены различными типами геологических отложений: аллювиальными, озёрно-аллювиальными, озёрно-болотными, полигенными и другими. Генетическое разнообразие этих форм является характерной особенностью. Рыхлые отложения в большинстве состоят из льдистых алевритов, суглинков, илов, илистых песков, песчаников с прослоями глины, иногда встречаются

супеси, пески и торфа с включениями льда [2]. Россыпные месторождения алмазов Анабарского алмазоносного района классифицируются по глубине залегания на следующие категории: мелкие (менее 3 м), очень неглубокие (3-6 м), неглубокие (6-12 м), средней глубины (12-20 м), глубокие (20-50 м) и очень глубокие (более 50 м). [3, 4].

По данным, опубликованных в работах [5, 6], проведён анализ строения массива горных пород россыпей р. Маят, р. Улегир, р. Кюрюктюр, руч. Исток, р. Хара-Мас, р. Биллях, руч. Гусиный.

**Россыпь р. Маят.** В южной части Анабарского улуса Республики Саха (Якутия), в бассейне реки Маят, которая является правым притоком реки Анабар, располагается россыпное месторождение алмазов, находящееся в 300 километрах от берега Северного Ледовитого океана.

Район, характеризуется обширным присутствием многолетнемерзлых пород с мощностью свыше 350 метров. Деятельный слой имеет толщину от 0,5 до 0,8 метров. На склонах южной экспозиции грунт оттаивает на глубину 0,5-1,2 м, северной - до 0,3 м.

Россыпь р. Маят классифицируется как аллювиальный тип россыпного месторождения. Согласно ее геолого-геоморфологическому строению, она подразделяется на четыре зоны: Приустьевой, Нижний, Средний и Верхний.

В районе пласта верхнечетвертичной россыпи р. Маят (на участках Кула и Олом) продуктивный слой примыкает к днищу долины маленького ручья, покрытого торфяными отложениями, толщина которых достигает 8 метров. Этот слой состоит из аллювиальных глинистых песков с различным содержанием гравия, гальки, щебня и камней, главным образом из местных карбонатных пород, варьирующимся от 20 до 50 %.

В пределах участка и на соседних территориях на уровне современного эрозионного среза залегают карбонатные породы среднего-верхнего кембрия, терригенные отложения перми и юры, вулканогенно-осадочные образования триаса, а также отложения нижнего мела и плиоцена, расположенные в карстовых и эрозионно-карстовых палеодепрессиях. На данной территории повсеместно

присутствуют четвертичные образования различных генетических типов: аллювиальные, озёрно-аллювиальные, озерно-болотные, полигенные и т.д. Интрузивные комплексы раннемезозойского возраста (правобоярский, эбехаинский и куонамский) пронизывают осадочную кору.

Бассейн р.Маят в геоморфологическом отношении представляет собой поверхность выравнивания денудационно-аккумулятивную неоген-верхнечетвертичного возраста, выработанную в доломитах анабарской свиты. Унаследованные с верхнечетвертичного времени долины современных водотоков врезаны в неё. В районе структурно-денудационный, денудационно-аккумулятивный, денудационно-эрозионный и эрозионно-аккумулятивный рельеф выделяется как несколько типов.

**Участок «Лог 405».** Россыпное месторождение алмазов ручей «Лог 405» расположено в юго-восточной части и является правым притоком руч. Курунг-Юрях, впадающего в р. Маят. Согласно морфогенетической классификации, россыпное месторождение алмазов ручья "Лог 405" разделяется на две части: верхнечетвертичную аллювиальную россыпь долинного типа и карстово-эрозионные долины. Это месторождение относится к категории мелких, простирающихся на протяжении 3,5 километров, с площадью менее 0,2 квадратных километров.

Продуктивный пласт россыпи приурочен к русловой фации верхнечетвертичных аллювиальных образований, выполняющих сравнительно ровное ложе долины. Основной контур россыпи в плане имеет лентовидную форму, при протяженности 3,5 км ширина пласта в пределах промышленного контура колеблется от 31,4 м до 78,4 м, в среднем составляя 53,0 м. Усредненный геолого-литологический разрез россыпи приведен в таблице 1.1. Торфа россыпи сложены льдистыми (до 50%) илами и суглинками толщиной от 1,0 до 3,6 м. Продуктивный пласт россыпи представлен льдистыми илистыми песками сравнительно низким содержанием щебня, гальки, гравия и некрупных валунов-плит. Большая часть обломков (70-80%) состоит из слабоокатанных пород – доломиты, окаменелые доломиты. Рельеф плотика пологий, слабоволнистый,

талъвег выражен слабо. Мощность верхнего слоя дезинтегрированных доломитов и щебнисто-глыбового элювия не превышает 10-20 см.

Таблица 1.1 – Геолого-литологический разрез россыпи ручья «Лог 405» (в пределах промышленного контура)

Интервал, м	Литологический состав слоя
0,0 - 0,4	ПРС. Суглинки деятельного слоя, обогащенные растительными остатками
0,4 – 2,5	Льдистые илы, суглинки
2,5-3,5	Аллювиальные льдистые илистые пески с переменным (20-40%) содержанием гравия, гальки, щебня и мелких валунов-плит
>3,5	Доломиты массивные, выветрелые, трещиноватые

Россыпь эрозионно-карстового типа плиоценового возраста. В верховьях ручья «Лог 405» буровыми скважинами и шурфами вскрыты песчано-глинистые отложения эбеляхской толщи плиоцена, выполняющие отдельные карстовые западины, в плане объединяющиеся в неправильный изрезанный контур площадью 43 тыс. м<sup>2</sup>. Мощность вскрытых осадков весьма изменчива. На фоне достаточно устойчивого преобладания песчанистых глин в разрезе встречаются маломощные прослои разнозернистых песков, обогащенных галькой и гравием силикатных пород, а также обломками доломитов.

**Участок «Лясегер-Юрях».** Ручей Лясегер-Юрях расположен в юго-восточной части и является левым притоком р. Маят. Промышленный пласт россыпи, который является частью мелких месторождений, простирается на 9,2 километра и имеет площадь менее 0,8 квадратных километров. Он приурочен к русловой фации верхнечетвертичных аллювиальных образований, занимающих широкое и относительно ровное коренное ложе долины. Литологический разрез россыпи представлен в таблице 1.2.

Льдистые илы и суглинки, составляющие торфа россыпи, имеют мощность от 0,9 до 5,5 метров, при этом содержат до 50 % льда. Русловая фация

верхнечетвертичного аллювия состоит из иловатых песков с невысоким содержанием щебня, гальки, гравия и небольших валунов плитчатой формы. Обломки, в основном, представлены местными породами, такими как доломитами и окремнелыми доломитами, которые около 70-80 % слабо окатаны. Плотик россыпи состоит из мелкозернистых толсто- и среднеплитчатых доломитов, часто выветрелых, трещиноватых, пористых и кавернозных, иногда на некоторых участках значительно окремненных.

Таблица 1.2 – Усредненный литологический разрез верхнечетвертичных отложений руч. Лясегер-Юрях

Интервал, м	Литологический состав слоя
0,0 - 0,4	ПРС. Суглинки деятельного слоя, обогащенные растительными остатками.
0,4 – 3,0	Льдистые илы, суглинки.
3,0-4,2	Аллювиальные льдистые илистые пески с переменным (20-40%) содержанием гравия, гальки, щебня и мелких валунов-плит.
>4,2	Доломиты массивные, выветрелые, трещиноватые; песчаники серые слаболитифицированные

**Участок «Очуос».** Ручей Очуос является правым притоком р. Анабар и впадает в него в 18 км выше устья р. Маят. Россыпь относится к мелким, протяженность составляет 10,1 км., площадь менее 0,5 км<sup>2</sup>. Промышленный контур отличается малой шириной 47,6 м. Продуктивный пласт россыпи приурочен к русловой фации верхнечетвертичных аллювиальных образований, выполняющих достаточно ровное, слабоволнистое коренное ложе долины. Усредненный литологический разрез россыпи приведен в таблице 1.3.

Характеристики торфа в россыпи отражаются в льдистых илах и суглинках, которые составляют до 50 % объема, с мощностью слоя от 1,3 до 5,5 метров, при средней мощности в 4,1 метра. Верхний слой россыпи, составленный из русловой фации верхнечетвертичного аллювия, представлен льдистыми иловатыми

песками с небольшим количеством щебня, гальки, гравия и мелких плоских валунов.

Обломки представлены слабо окатанными «местными» породами – доломитами, окремнелыми доломитами. Плотик россыпи представлен мелкозернистыми тонко- и среднеплитчатыми пористыми и кавернозными доломитами, на отдельных участках окремненными.

Таблица 1.3 – Усредненный литологический разрез верхнечетвертичных отложений россыпи ручья Очуос

Интервал, м	Литологический состав слоя
0,0 - 0,4	ПРС. Суглинки деятельного слоя, обогащенные растительными остатками.
0,4 – 3,8	Льдистые илы, суглинки.
3,8-5,5	Аллювиальные льдистые илистые пески с переменным (20-40%) содержанием гравия, гальки, щебня и мелких валунов-плит.
>5,5	Доломиты массивные, выветрелые, слабо трещиноватые.

**Россыпные проявления алмазов р. Улегир.** Россыпные проявления алмазов в бассейне р. Улегир установлены в пределах 3-х геоморфологических уровней: в русловой фации аллювия высокой поймы, первой надпойменной террасы и в галечниках реликтов верхнечетвертичной долины.

В современном уровне высокой поймы, протяженность условного промышленного контура составляет 17 км, ширина 20 м, местами ширина увеличивается до 140 м (средняя ширина – 52 м). Современный аллювий представлен супесями, песками и алевроитами пойменной фации сплошностью 1,2 – 6,4 м, русловыми галечниками мощностью от 0,9 до 2, 2 м, в среднем составляя 1,5 м.

Долинная верхнечетвертичная россыпь имеет протяженность 1 км, ширину 119 м, средняя мощность торфов и песков по промышленному контуру составляет 2,0 м и 6,1 м соответственно. Торфа россыпи представлены льдистыми илистыми песками, пески – галькой долеритов, окремненных доломитов, песчаников, реже



кремнем и кварцитопесчаниками, сцементированной слабглинистым песком. Плотик сложен песчаниками верхнего отдела перми.

Террасовая россыпь. Ширина россыпи составляет 60 м, длина 500 м. Аллювий I надпойменной террасы представлен песчанистыми галечниками, сложенными песком (30%), гравием и галькой (70%). Галечный материал залегает на размытой поверхности нижнепермских песчаников и представлен кремнистыми породами (50-60%), песчаником (15-20%), долеритами (15-20%). Мощность торфов и песков составляет 11,8 м и 1,4 м соответственно.

**Россыпное проявление алмазов р. Кюрюктюр.** На россыпном проявлении алмазов р. Кюрюктюр выделены участки с потенциально-промышленным уровнем полезных ископаемых в пределах высокой поймы и первой надпойменной террасы. Ширина промышленного контура составляет 271 м, протяженность блока ресурсов 2,5 км. Мощности торфов и песков характеризуются средней изменчивостью. Торфа россыпи представлены льдистыми илами с незначительной примесью песка. Мощность торфов колеблется от 2,7 м до 7,0 м, средняя мощность составляет 4,6 м. Пески россыпи представлены валунно-гравийно-галечными образованиями с содержанием грубообломочного материала до 67%. Размер валунов 30-40 см, галек 2-3 см. В петрографическом составе валунов входят долериты, галек - долериты, песчаники, кремнистые породы, кремни и сидерит. Средняя мощность песков в пределах промышленного контура составляет 2,4 м. Подстилающими породами являются аргиллиты нижней перми.

Террасовая россыпь. Промышленный контур имеет ширину 40 м, а длина россыпи равна 0,75 км. Торфовые отложения включают илы, суглинки, лёд с добавлением илистой субстанции, а также илистые песчаники с зернистой галькой. Песчаники характеризуются галечными образованиями, формациями валунно-гравийно-галечно-песчаного типа и многообразными песчаниками с элементами гальки и гравия.

**Россыпное месторождение алмазов руч. Исток.** Отличительной особенностью рыхлых отложений в этом районе является повышенная

льдистость. Грунтовый лед присутствует в виде различных структур, таких как прожилки, клинья и линзы, с толщиной от нескольких миллиметров до 4,0-5,0 метров. Торфяные россыпи в участке "Исток" состоят из иловатого, глинистого или супесчаного материала, иногда с примесью обломочного материала размером более 1 мм, который легко различим на фоне основных отложений. Продуктивный пласт в своём составе характеризуется песчано-гравийным и галечно-щебенистым соединением. Валунно-глыбовая составляющая имеет в основном валуны и угловатые доломитовые плиты с размерами в диапазоне 15-40 см (иногда больше). Процентное содержание валунов варьируется от 0 до 40%, но в среднем не превосходит 5-7%. Также продуктивные слои, как и над ними расположенные глинистые формации, постоянно находятся в мерзлом состоянии. Глубина протаивания невелика, колеблется в пределах от 0,5-0,7 до 2 метров.

**Россыпное месторождение алмазов р. Хара-Мас.** Месторождение относится к аллювиальному типу россыпей, где пласт залегает на глубине до 4-5 метров, при этом покрыт торфом толщиной до 1,5 метра. Общая протяженность россыпи составляет 12,1 километра и не имеет промежутков. Средняя ширина внутри промышленного контура запасов составляет 68,6 метра. Вскрышные породы представлены серыми суглинками и иловатыми суглинками. Мощность вскрыши составляет в среднем 2,35 метра. Отмечена значительная льдистость грунтов. Алмазоносные пески состоят из мерзлотного песчано-гравийного материала с валунами (размером более 100 мм), занимающими от 0,5 до 38% объема; мощность этого пласта в среднем составляет 1,83 м. Доломиты различной текстуры составляют основу россыпи.

**Россыпное месторождение алмазов р. Биллях.** Месторождение относится к аллювиальным типам россыпей с мелким горизонтом залегания и готово для открытой разработки. Россыпные породы (вскрыши торфа) характеризуются иловыми, суглинистыми или песчаными слоями с добавлением гравия и дресвы, что визуально делает их отличными от продуктивных слоёв (песков). Торфяные слои имеют среднюю мощность в 2,45 м при коэффициенте вскрыши 3,3.

Алмазоносные песчаные слои содержат комбинацию песка, гравия, гальки и щебня с примесью илового, глинистого и валунно-глыбового материала.

**Россыпное месторождение алмазов руч. Гусиный.** Торфа россыпи состоит из иловатого, глинистого или супесчаного с добавлением обломочного материала. Продуктивный пласт характеризуется песчано-гравийно-галечно-щебенистым материалом с примесью глинистой части и валунно-глыбовых элементов. Средняя мощность торфов составляет 3,0 метра, при этом в центральной зоне отмечается наивысшая толщина вскрышных пород. Средний коэффициент вскрыши составляет 1,67, а средняя мощность продуктивного слоя равна 2,37 метра.

Таким образом, в зависимости от глубины залегания плотика россыпные проявления и месторождения алмазов можно разделить на две группы:

1) Месторождения с глубиной залегания до 6 метров, в которые входят месторождения с очень неглубокозалегающими рыхлыми отложениями, такие как: Лог «405», руч. Лясегер-Юрях, участок «Очуос», р. Исток, р. Хара-Мас, р. Биллях, руч. Гусиный.

2) Месторождения с глубиной залегания до 12 метров, в которые входят месторождения с неглубокозалегающими рыхлыми отложениями, такие как: россыпь р. Маят, р. Улегир, р. Кюрюктюр.

В долинах преобладают рыхлые отложения, в основном представленные глинисто-песчано-галечниковыми образованиями, обычно покрытыми сверху тонким слоем почвенного мохо-торфяного покрова мощностью от 0,2 до 1 метра. Под аллювиальными отложениями располагается слой элювия мощностью от 0,6 до 0,8 метра, состоящий из щебня коренных пород с примесью глины и песка. В нижней части этот слой постепенно переходит в коренные породы плотика, где преобладают глинистые, песчано-глинистые сланцы, песчаники и массивные доломиты. Поверхность плотика характеризуется сложным микрорельефом, чаще всего выраженным плавными формами. Валунистость рыхлой толщи невелика и составляет в среднем 4-6 %, однако на отдельных месторождениях она достигает 30-40 % и более.

Литологические особенности рыхлых отложений россыпей, как в различных долинах, так и в одной долине могут быть весьма разнообразными. В основном это галечно-гравелистые породы весьма неоднородного гранулометрического состава с включением песка, супесей, суглинков и щебня. В общем, для разреза рыхлых отложений россыпных месторождений характерно примерно следующее чередование слоев:

- мохо-торфяной слой мощностью в несколько десятков сантиметров;
- супесь илистая (ниже переходящая в пылеватый песок с включениями гравия и гальки) мощностью от 0,1 до 1 м и более;
- слой гравия и гальки с порами, заполненными песком, супесью и суглинком; имеют место включения валунов и ледяных линз. Мощность отложений колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров;
- щебень коренных пород плотика россыпи (глинистых сланцев, алевроитов, песчаников) с супесчаным и суглинистым цементом; включения гальки и валунов. Мощность этого аллювиально-элювиального слоя колеблется от нескольких десятков сантиметров до 1-2 м и более;
- коренные породы россыпи – глинистые сланцы, плитчатые песчаники и массивные доломиты.

В строении многолетнемерзлых толщ в районе россыпных месторождениях алмазов принимают участие породы архейского метаморфического комплекса, а также осадочные породы протерозоя и фанерозоя. В них распространены основные типы подземных льдов: лёд цемент, жильный лёд, инфильтрационный, сублимационный. Развитие повторно-жильных льдов связано с процессами морозобойного растрескивания, условия, формирования которых на данной территории в пределах различных морфоструктур неодинаковы. Широкое развитие сингенетических и эпигенетических повторно-жильных льдов характерно здесь только для участков распространения пойменных и озерно-болотных отложений. Мощность ледяных жил в них не превышает 1-3 м, жилы растущие, глубина их залегания составляет 0,3-0,5 м. Над ледяными жилами нередко наблюдаются открытые трещины шириной 0,5-5 см. Повторно-жильные

льды, незатронутые термокарстом, обычно слабо выражены в рельефе и плохо читаются на аэрофотоснимках. Форма полигонов, как правило, плоская, безваликовая [7].

На севере территории в пределах низких пластовых плато повторно-жильные льды установлены практически во всех генетических комплексах рыхлых четвертичных отложений. Наиболее широкое развитие они имеют в аллювиальных, озерно-аллювиальных, озерно-болотных и делювиальных отложениях. Характерной особенностью распространения повторно-жильных льдов является их приуроченность не только к супесчано-суглинистым, но и к песчаным и крупнообломочным отложениям. Мощность повторно-жильных льдов, как правило, контролируется мощностью рыхлых отложений и не превышает 2-4 м, в пределах аллювиальных террас, полигональных и плоскобугристых торфяников до 5-7 м. Формирование повторно-жильных льдов в настоящее время наблюдается в пределах полигональных и плоскобугристых торфяников, на участках верховых болот, низкой и высокой поймы, частично I надпойменной террасы, на некоторых участках долин временных водотоков и подножий склонов.

## 1.2 Электрические и физико-механические свойства горных пород рыхлых отложений россыпных месторождений субарктической зоны

Лед является важнейшим породообразующим минералом и мономинеральной горной породой криолитозоны. Он присутствует в мерзлых породах в виде льда-цемента, включений, а также в виде отдельных крупных скоплений. В целом подземный лед составляет около 2% общего объема льдов криосферы (около 0,5 млн. км<sup>3</sup>) [8].

На основе представленной обобщенной характеристики россыпных месторождений алмазов криолитозоны подтвержденная глубина залегания исследуемого объекта варьируется от 0 до 12 м. Таким образом, актуальны исследования на неглубокозалегающих месторождениях. В современных

наземных малоглубинных исследованиях используются такие методы, как электротомография, микросейсморазведка, георадиолокация и другие геофизические методы [9, 10].

В районах Крайнего Севера наличие многолетнемерзлых горных пород и льдов сопровождается большим разнообразием их физических характеристик. Причиной этому служит различие в минеральном составе, структуре, многофазность и происхождение самих пород. Согласно исследованиям в сфере многолетнемерзлых пород, ключевыми методами геофизического изучения мерзлых горных пород являются высокочастотная электроразведка и сейсморазведка. Электроразведка является одним из главных методов и применяется на различных этапах поисковых и картировочных работ, особенно в криолитозоне, где отмечается большая вариабельность электрических характеристик пород и их различное теплофизическое состояние [11].

Широкий диапазон значений физических свойств массива горных пород объясняется сложным строением, в том числе и включением ПЖЛ. Физические характеристики горных пород, определенные стандартными методами с указанием их состава и строения, представляют собой стандартные справочные данные о них. В соответствии с классификацией, принятой в физике горных пород, основные группы физических свойств варьируются в зависимости от вида воздействующего физического поля: плотностные, механические, тепловые, электрические, магнитные, волновые, радиационные и гидрогазодинамические. Для сравнения различных горных пород, их совместного анализа и рассмотрения были выделены 12 основных независимых базовых физических параметров, которые могут быть использованы для расчета других параметров горных пород. Эти базовые параметры могут быть представлены в виде стандартизированной цифровой записи, которая служит своего рода паспортом горных пород по их физическим характеристикам [12].

Характерной особенностью исследуемых нами месторождений (подглава 1.1) является повсеместное распространение толщ многолетнемерзлых пород. Районы с наличием многолетнемерзлых пород характеризуются особыми типами

мерзлотно-геофизических разрезов, обусловленных, прежде всего физическими свойствами горных пород при отрицательных температурах [13,14]. К основным параметрам физических свойств горных пород, определяемым с использованием геофизических методов, относятся электрофизические характеристики, такие как диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon'$ ) и удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ), а также скорость упругих волн ( $v$ ) [15-23].

**Удельное электрическое сопротивление горных пород.** Большинство методов электроразведки базируются на измерении удельного электрического сопротивления ( $UЭС$  или  $\rho$ ), выраженного в Ом\*м, или его обратной величины ( $\gamma = 1 / \rho$ ) – электропроводности, измеряемой в сименсах (См) [24]. Удельное электрическое сопротивление льда из пресных вод очень высоко ( $10^5 - 10^8$  Ом\*м), в то время как у льда из минерализованных вод оно ниже ( $10^2 - 10^4$  Ом\*м) и зависит от содержания в нем солей и их состава. Поэтому при промерзании горных пород их сопротивление обычно резко увеличивается (при температурах от  $-0,5$  до  $-5$  °С), иногда плавно (при температурах от  $-2$  до  $-10$  °С). В зависимости от обводненности, пористости, литологии, особенностей теплового режима, льдистости и криогенной структуры сопротивление скальных пород при промерзании увеличивается в несколько раз и обычно не превышает  $10^3$  Ом\*м, для мелкодисперсных рыхлых пород (глины, суглинки и т.д.) – в 10-100 раз, для крупнодисперсных пород (пески, гравийно-галечные отложения) – в 100-1000 раз [13, 25]. Диапазон значений удельного сопротивления мерзлых рыхлых отложений чрезвычайно велик: изменения в гранулометрическом составе, наличие льда и различия в типе криогенной текстуры и структуры могут привести к изменению удельного сопротивления в пределах от 10 до  $7 \cdot 10^6$  Ом\*м.

**Скорость упругих волн мерзлых горных пород.** Скорость распространения упругих волн в мерзлых горных породах зависит от множества факторов, включая пористость, наличие трещин, литологический состав и другие, физические и геологические характеристики породы. Когда горные породы переходят в мерзлое состояние, скорость распространения упругих волн увеличивается. Это связано с различием скоростей упругих волн во льду и в воде.

Например, скорость продольных волн ( $V_p$ ) во льду равняется 3100-4200 м/с, тогда как в воде она составляет 1450 м/с. Скорость поперечных волн ( $V_s$ ) во льду составляет 1600-2100 м/с, а в воде она равна нулю. Важное значение имеет также цементирующее воздействие льда. При промерзании грубодисперсных пород значения скорости продольных волн ( $V_p$ ) увеличиваются в 3-5 раз, а скорости поперечных волн ( $V_s$ ) – в 5-15 раз, в то время как в тонкодисперсных породах, из-за наличия большего количества незамерзшей воды в массиве горных пород, увеличиваются соответственно в 1,5-3 и 5-7 раз. При промерзании трещиноватых скальных пород скорость упругих волн обычно увеличивается не более чем в 2-3 раза. В коренных монолитных породах скорость упругих волн практически не меняется при переходе на отрицательных температурах [26].

**Диэлектрическая проницаемость мерзлых горных пород.** Точность определения глубины, на которой расположены границы, отражающие электромагнитные волны (ЭМВ), прямо коррелирует с правильностью учета скорости их распространения. Эта скорость, в основном, определяется вещественной частью комплексной относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ). Диэлектрические характеристики мерзлых грунтов могут сильно варьироваться, особенно в теплые месяцы, когда их электропроводимость колеблется в широких пределах. Исследования показали, что диэлектрическая проницаемость у мерзлых горных пород обычно остается в определенных диапазонах: для мерзлых песков  $\epsilon'$  составляет 4 - 6,8, а для мерзлых дисперсных пород – 6,5-7,2 [18, 27].

Мерзлые горные породы классифицируются на три категории, как указано в работе Гальперина и соавторов 2009 года. Якупов В.С. утверждает, что критерий этой классификации основан на количестве незамерзшей и, в частности, связанной воды [28]. Большее содержание такой воды соответствует повышенной диэлектрической проницаемости и сниженному удельному электрическому сопротивлению. Первая категория включает в себя мерзлые породы с низкой удельной поверхностью, пропитанные пресной водой. Их удельное электрическое сопротивление варьируется от 2000 до 10000 Ом\*м, а диэлектрическая



проницаемость составляет от 5 до 30. При снижении удельного сопротивления, диэлектрическая проницаемость возрастает, что связано с ростом удельной поверхности мерзлых пород и, следовательно, объема связанной воды. Вторая категория включает мерзлые микропористые породы, такие как мергели и кимберлиты, а также, возможно, талые породы, аналогичные тем, что относятся к первой группе. Их удельное сопротивление колеблется от 300 до 1500 Ом\*м, а диэлектрическая проницаемость – от 20 до 70. Третью группу составляют засоленные породы различного литологического и петрографического состава, с удельным электрическим сопротивлением менее 300 Ом\*м и диэлектрической проницаемостью от 50 до 80.

**Физико-механические свойства горных пород россыпей.** Физико-механические свойства торфов, песков и кровли коренных пород россыпей, важные для проведения горнопроходческих работ (ГПР), вскрышных и добычных процессов, учитываются на основе данных геологоразведки, инженерно-геологических изысканиях и эксплуатационной разведки. На участках россыпей, на глубине современного эрозионного среза, преобладают карбонатные породы среднего-верхнего кембрия. Встречаются также терригенные слои перми и юры, вулканогенно-осадочные формации триаса, а также отложения нижнего мела и плиоцена, расположенные в карстовых и эрозионно-карстовых формах рельефа. Четвертичные формации в этом районе широко распространены и включают разнообразные генетические типы, такие как аллювиальные, озёрно-аллювиальные, озерно-болотные, полигенные и др. Породы осадочного покрова пронизаны интрузивными образованиями раннемезозойского периода (правобоярский комплекс).

Россыпи характеризуются стабильным литологическим, гранулометрическим и минеральным составом рыхлых формаций, однако их мощность и содержание могут варьироваться. Торфа, встречающаяся в россыпях, представлена илами и суглинками средней дисперсии, которые визуально отличимы от песков. Граница между торфом и песком четкая, волновая, без резких изменений.

Песчаники россыпей имеют смешанный состав из песка, гравия и гальки, иногда с примесями валунов и иловато-глинистых отложений, и обладают средним размером частиц. К этому же слою можно отнести верхний слой коры выветривания, состоящий из доломитовой муки с доломитовым гравием.

Кровля коренных пород россыпи состоят в основном из доломитов, порой из известняков, которые массивны, слабо выветрены на поверхности, имеют трещины и иногда разлагаются на продукты выветривания.

При проведении оперативного контроля БВР учитываются физико-механические характеристики горных пород. Доломиты и известняки классифицируются как породы VI-VII категории крепости по буримости, что означает, что они обладают высокой устойчивостью к бурению (по единой классификации, давление для разрушения породы составляет 1600-2100 Н/см<sup>2</sup>). Они также имеют коэффициент крепости  $f$ , равный 8 по шкале классификации грунтов, введенной профессором М.М. Протоdjаконовым [31-33].

В процессе разведки и разработки месторождений россыпных алмазов используются буровзрывные работы для выполнения массовых взрывов с различными целями:

- рыхление массива торфов, осуществляемое с помощью бульдозеров до глубины 3,0 м;
- рыхление песчаного массива в зимний период с использованием бульдозеров;
- прокладка илоотстойников, зумпфов и каналов для стока (ГПР, ГТС), необходимых для обеспечения добычных работ;
- добыча строительных материалов (доломитов, известняков) из карьеров в качестве строительного материала для объектов ГПР и ГТС [31-33].

Таблица 1.4 – Усредненные нормативные физико-механические свойства пород месторождений [29,30]

Тип грунтов	Коэффициент разрыхления	Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	Группа грунтов По СНиПу	Льдистость	
				Объемная	весовая
<i>Прииск Маят (р.Эбелях, р.Маят)</i>					
Торфа	1,39	1,32	IV	45,3	22,6
Пески	1,36	1,66	VI	31,49	11,62
Плотик (доломиты, известняки)	1,35		VIII	0,1	
<i>Прииск Молодо (р.Молодо)</i>					
Торфа	1,98	1,25	IV		29,7
Пески	1,36	1,83	VI	13,15	3,81
Плотик (доломиты, известняки)	1,35		VIII	0,1	

Согласно результатам научных исследований, основной характеристикой состава многолетнемерзлых осадочных пород является наличие льда в их структуре. Лед может присутствовать в виде цементирующего материала, состоящего из мельчайших кристаллов, а также в виде отдельных включений, таких как шлиры (прослой, линзы и пятна), а также крупных ледяных образований в трещинах и пластах. Характеристики льда, такие как количество, размеры, форма и распределение, определяют особенности структуры мерзлого породного массива, что проявляется в его криогенной текстуре [31-33]. Однако, необходимо оценить влияние включения ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, при проведении буровзрывных работ на разрабатываемых участках россыпных месторождениях криолитозоны.

В процессе промерзания рыхлых отложений формируется уникальная мерзлая текстура, которая может иметь различные характеристики:

а) массивная текстура (рисунок 1.1а), где вся влага в породе превращается в ледяной цемент;

б) слоистая текстура (рисунок 1.1б), характеризующаяся наличием ледяных включений, располагающихся в основном в параллельных слоях;

в) Сетчатая текстура (рисунок 1.1в), где ледяные включения образуют более или менее регулярную пространственную сетку. Для скальных пород характерно заполнение льдом трещин.

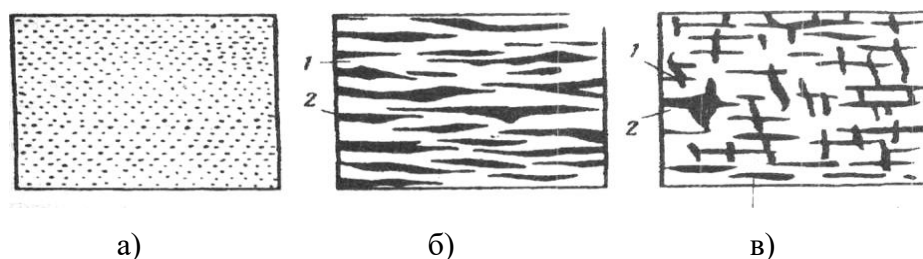


Рисунок 1.1 – Текстура мерзлых пород: а) массивная; б) слоистая; в) сетчатая.

1 -минеральная составляющая породы; 2-лед.

В зависимости от взаимодействия льда с минеральным скелетом, мерзлые породы классифицируются на твердые, пластичные и сыпучие. Твердомерзлые породы характеризуются практической несжимаемостью и хрупким разрушением. Пластично-мерзлые породы обладают вязкими свойствами и способны сжиматься под воздействием нагрузок. Среди них выделяются тонкодисперсные породы, которые при отрицательной температуре сжимаются при следующих показателях, не ниже:  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  для пылеватых песков,  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  для супесей,  $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  для суглинков и  $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  для глины [34]. Сыпучее состояние мерзлых пород характерно для крупнообломочных и грубодисперсных пород при низкой влажности. Степень сцепления минеральных частиц льдом оценивается через объемную льдистость, на основании которой породы подразделяются на слабо льдистые (содержание льда менее 25%), льдистые (содержание льда от 25 до 50%) и сильно льдистые (содержание льда более 50%).

В сложноструктурных породных массивах, когда в общем объеме относительно слабых пород имеются гравийно-галечные и щебеночные включения более прочных пород, сцементированных льдом, разрушение может

быть достигнуто по льдо-цементному наполнителю с минимальными затратами энергии.

В случае, если сопротивление минерального скелета породы близко к прочности льда, замерзание породы, как правило, способствует увеличению его прочности, поскольку разрушение скелета породы компенсируется силами смерзания. Понижение температуры породы ниже  $0^{\circ}\text{C}$  при постоянной влажности приводит к повышению ее прочности за счет влаги в более мелких порах [34].

Если в крепких скальных породах почти весь объем разрушения обусловлен действием волны, то в мерзлых рыхлых породах, обладающих повышенными вязко-пластическими свойствами, основным разрушающим фактором является поршневое давление газообразных продуктов детонации. Однако на начальном этапе взрыва, когда происходит предразрушение мерзлого массива путем образования сети трещин, большое значение имеют условия распространения фронта ударной волны [35].

Воздействие криогенной текстуры на взрываемость мерзлых пород можно проиллюстрировать следующим образом: при наличии базальной текстуры воздействие взрывной нагрузки вызывает быстрое растрескивание массива по льду-наполнителю. В таком случае увеличение удельного расхода взрывчатых веществ (ВВ) не дает желаемого результата дробления пород. Массивная текстура, которая характерна для песчаных пород с небольшой примесью глины, приводит к ухудшению их взрываемости, особенно если лед-цемент, заполняющий все поры, находится в пластичном состоянии. Механическое воздействие взрыва существенно ослаблено в высоко-глинистых породах, имеющих шлировую текстуру. Здесь ударная волна значительно ослаблена из-за мгновенной "податливости" ледяных шлиров к деформациям, а также из-за многократного отражения от линз и прослоек льда. Наличие льда и его примесей с мелкодисперсным материалом в трещинах относительно плотных пород также снижает разрушающее воздействие волн напряжений [36-38].

### 1.3 Современное состояние геофизических исследований подземных льдов

В основе исследования строения рыхлых отложений, в том числе массива горных пород с включением ПЖЛ, лежит метод колонкового бурения, где обеспечивается получение информативных образцов в виде керна из определенных слоев горных пород. Однако, для получения дополнительной и непрерывной информации о строении массива горных пород применяются геофизические методы. Эти методы исследований не разрушают окружающую среду, поскольку при их использовании практически не нарушается верхний слой грунта. Это особенно важно в условиях тундры, где разрушение верхнего слоя грунта может привести к геокриологическим процессам, таким как деградация мерзлоты. Геофизические методы обеспечивают получение непрерывной информации о глубине залегания и распространении пород, а также об изменениях в их состоянии и свойствах, в отличие от бурения, что делает их более предпочтительными в таких условиях.

К задачам геокриологических исследований, решаемых с применением геофизических методов, относятся определение положения кровли мерзлых горных пород, изучение строения толщи мерзлых горных пород с включением подземных льдов, таликов, криопэгов, зон фильтрации, оценка физико-механических свойств мерзлых горных пород и их изменения и др. [39].

Аналитический обзор литературных источников, проведенный по геофизическим исследованиям подземных льдов, показал, что имеется обширный опыт выполнения полевых и лабораторных исследований, в рамках которых были разработаны разнообразные методики, демонстрирующие свою высокую эффективность. Для исследования подземных льдов, ведущими геофизическими методами, являются сейсморазведочные, электроразведочные, в том числе и георадиолокация. По результатам анализа необходимо выделить работы таких ученых, как из отечественных исследователей: Федоровой Л.Л., Соколова К.О., Гриба Н.Н., Оленченко В.В., Мельникова В.П., Скворцова А.Г., Садуртдинова М.Р., Селяева В.А., Бричевой С.С., Едемского Д.Е., Прокоповича И.В. и др

[40-48], так и из иностранных исследователей: Christin Hilbich, Jon Engström, Manuel Gómez Lende, Thomas Ingeman-Nielsen, Katarina Pukanska, Emma F. Stubbs etc [49-52].

**Сейсморазведочные методы.** В 2016 г. исследователями Грибом Н.Н., Сясько А.А. и др. для получения подробной и однозначной информации о структуре объекта горно-обогатительного комбината и золото-сурьмяного месторождения "Сентачан" были проведены комплексные геофизические исследования с использованием методов сейсморазведки и электротомографии [53]. В результате инженерно-геофизических изысканий была уточнена геологическая конфигурация района, а также выявлены потенциально опасные инженерно-геологические особенности, которые могут повлиять на функционирование планируемых сооружений. Одной из задач было выявление наличия льдистых горных пород и подземных льдов. Геофизические работы выполнялись высокой детальностью, - шаг сейсмоприемников по профилям равнялся 2 м., расстояния между электродами электротомографии составляла 5 м. По результатам электротомографии построен план изолиний, позволяющий оценить возможное положение распространения подземных льдов и льдистых горных пород в массиве тридцати метровой толщи. Анализ данных сейсморазведки КМПВ показал, что области с аномально высокими электрическими сопротивлениями совпадают с интервалами, где наблюдаются наиболее низкие скорости распространения упругих волн. Подобные характеристики встречаются у рыхлых или сильно трещиноватых скальных пород с высоким содержанием льда, а также в областях наличия подземных льдов. Для подтверждения результатов геофизических исследований были выполнены буровые работы, которые показали совпадение областей с высоким сопротивлением и низкими скоростями распространения упругих волн с интервалами, где развиваются подземные льды. Кроме того, форма аномалий соответствует границам инженерно-геологических разрезов.

В работе исследователя Скворцова А. Г. были рассмотрены перспективы использования динамического коэффициента Пуассона в качестве

дополнительного критерия сейсмической идентификации мерзлого состояния водонасыщенных песчано-глинистых пород. Проведенный анализ литературных источников и результаты многолетних экспериментальных исследований в арктических районах Западной Сибири и европейского Севера позволили установить, что диапазон значений коэффициента Пуассона от 0,45 до 0,46 выступает в качестве граничного между мерзлым и талым состояниями водонасыщенных песчано-глинистых пород [44]. При значении коэффициента Пуассона, равном 0,46 и выше, породы независимо от их состава, температуры и минерализации находятся в талом состоянии, в то время как при значениях 0,45 и ниже они находятся в мерзлом состоянии. Использование коэффициента Пуассона демонстрирует высокую эффективность при определении мерзлого состояния глинистых пород [44].

**Электроразведочные методы.** В статье ученых из Технического университета Дании представлено результаты геофизического исследования территории с полигональными формами рельефа с целью возможности использования метода электротомографии постоянного тока (ERT) и георадиолокации (GPR) для выявления и картирования ледяных жил [49]. Участок расположен в центральной части Западной Гренландии, а ледяные жилы обнаружены в мерзлых торфяных породах с деятельным слоем около 30 см. Разрезы электротомографии и георадиолокационные радарограммы дают последовательную интерпретацию возможных местоположений ледяных жил, а зондирование активного слоя показывает тенденцию к большей глубине оттаивания в основных системах траншей, что согласуется со значительным повышением температуры (на глубине 10 см) в этих траншеях, выявленным с помощью термического профилирования. В ходе работы были пробурены три неглубокие скважины, но жильных льдов обнаружено не было. Поскольку окончательная интерпретация не предсказала появление ледяных жил в местах скважин, результаты не противоречат друг другу, но для окончательной проверки необходимо больше данных.



В 2018 г. в работе Оленченко В. В. представлены результаты геофизических исследований методами электротомографии и георадиолокации, проведенные на побережье острова Самойловский [42]. Остров Самойловский состоит из трех геоморфологических поверхностей: 1-й террасы, высокой и низкой поймы, которые имеют максимальные высоты 8,5 м, 7,5 м, 6,5 м соответственно. Эти поверхности различаются по осадочным толщам, типу подземных льдов, особенностям морфологии рельефа и типичны для значительной части дельты р. Лена [54]. В рамках данного исследования одной из задач является локализация жильного льда с помощью применения электроразведочных методов: электротомография и георадиолокация. В описании геологического разреза строения исследуемого участка отмечено, несколько жильных льдов с размерами которых: ширина 0,8-1,6 м, глубина залегания 4,5 м. Вмещающая среда состоит из песков средней крупности, с прослоями серой песчанистой алевритистости. Электроразведочные данные получены аппаратурой «Скала48» с 48 электродами, с расстоянием между ними 2,5 м. Исследования методом электротомографии проводились с помощью установки «Шлюмберже». В результате полученные данные, дают обобщенную картину геоэлектрического строения. Жильные льды при этой съемке не были выявлены - возможно, из-за расстояния между электродами, которая превышает ширину жильных льдов. Исходя, из этого необходимо проводить более детальную съемку электротомографии по тому же профилю. По результатам работы жильные льды, на геоэлектрическом разрезе на высокоомном фоне не были прослежены. Однако, достаточно хорошо определена граница деятельного слоя. Она не превышает 1,5 м. по всему профилю, где граница имеет неровную форму, что может, связано с неравномерным таянием грунта деятельного слоя над жильными льдами и между их местоположениями.

В работе Селяева В. А. показаны результаты изучения структуры криолитозоны полуострова Ямал. Были проведены исследования с использованием метода зондирования поля в ближней зоне, представляющего собой малоглубинную модификацию. Общий объем исследований составил более 4000 км<sup>2</sup> с плотностью наблюдений 19.8 ф.т./км<sup>2</sup>. Для успешной реализации

такого масштабного проекта в сложных климатических условиях была разработана высокопроизводительная методика работ, использующая современный цифровой программно-измерительный комплекс FastSnap. Результаты исследований позволили изучить распределение геоэлектрических параметров на глубину до 500 м и выявить участки развития многолетнемерзлых пород, области развития таликов и криопэгов [43].

**Метод георадиолокации.** В работе [52] словацких ученых (2023 г.), современные технологические средства позволяют осуществлять всестороннее исследование и оценку межгодовых изменений как в основании, так и в стенках подземного льда. Например, цифровая фотограмметрия в сочетании с точной цифровой тахеометрией предоставляет возможность выявлять накопление и потерю льда, включая эффект сублимации из-за потока воздуха, а также наблюдать скользящие движения ледяной линзы в нижнюю часть пещеры. В последние два года из-за сложности измерений были добавлены геофизические методы (микрогравиметрия и георадиолокация) для определения толщины подземного льда в верхних частях пещеры. Исследование было проведено Добшинской ледяной пещере. Хотя пещера расположена за пределами высокогорной местности, в ней находится одна из крупнейших линз подземного многолетнего льда. В последние десятилетия быстрого изменения климата это природное образование подверглось быстрым изменениям, динамично влияющим на форму ледяного тела. Не только увеличение количества осадков, повышение круглогодичной температуры поверхности, но и сила тяжести вызывают значительные изменения формы ледяного заполнения. В статье рассматриваются не только современные технологические возможности, но и отмечаются ограничения этих технологий. Затем излагаются решения, предлагающие технологические процедуры для получения точных геодезических и геофизических данных.

В 2016 г. на севере Испании проведены исследования методом георадиолокации для определения свойств ледяных пещер: ледяная пещера Реña Castil и Picos de Europa [47]. В этой статье показаны, что радарограммы

интерпретируются с точки зрения внутренней структуры, стратификации, уплотнения, толщины и объема ледяной глыбы в ледяной пещере Пенья-Кастиль (центральный массив Пикос-де-Эуропа, северная Испания), обеспечивая эндокарстовую геометрию льда. В результате исследования были получены восемь радарограмм с помощью экранированной георадарной антенной с центральной частотой 400 МГц. Авторы показывают, что радарограммы не отображают границу раздела лед-основание, они предполагают, что ледяная глыба имеет глубину не менее 54 метров и такую же толщину. Некоторые признаки изогнутых отражений предполагают потенциальное вертикальное смещение ледяной глыбы и, следовательно, определенную динамику ледяного тела. На других радарограммах видны многочисленные переслаивающиеся обломки и тонкие слои отложений, представленные в виде полосчатых отражений. В этой конкретной пещере прямой визуальный осмотр стратиграфии льда является сложной задачей, но метод георадиолокации обеспечивает получение четкие картины некоторых ее внутренних особенностей, что делает георадиолокацию подходящим методом для этого и будущих исследований, позволяющих достичь лучшего и более широкого понимания строения массива ледяных пещер.

В работе Нерадовского Л.Г. результаты комплексного анализа структуры многолетнего бугра пучения–булгунняха и характеристик залегания линз подземного льда инъекционного генезиса описаны с использованием методов бурения, термометрии скважин, а также геофизических методов (дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП) и георадиолокация). Объектом исследований являлся бугор пучения, находящийся в г. Якутске. По результатам буровых работ, скважина, которая находилась на самой макушке бугра пучения, мощность льда составляет 0,45 м на глубине около 7 м. В статье описаны методики полевых геофизических работ, Изложены данные о затухании индуктивной и импульсной электромагнитной волны в многолетнем бугре пучения на глубину до 9 метров, а также представлен фрагмент радарограммы с профилем, пересекающим вершину булгунняха [55].

В последние годы георадарные технологии широко применяются для решения различных геотехнических задач, в частности, в областях распространения многолетнемерзлых пород. Особый интерес к инженерно-геологическим изысканиям представляют ледяные пласты и жильный лёд, имеющий форму клина. Наличие таких образований существенно усложняет проведение работ с использованием электромагнитных методов, в том числе и георадиолокацию. В связи с этим автор показывает в работе результаты математического моделирования в программе matGPR R3, распространения георадиолокационного сигнала в среде, слоях или горных породах с прослоями с высокими значениями УЭС или неоднородностями в форме клина [56]. А также представлены результаты физического моделирования, которое проводилось в баковой установке. Автор в проведенных исследованиях показывает, что мощность тонких (менее  $\frac{1}{2}$  длины волны) ледяных слоев может быть определена с помощью георадара только при наличии дополнительных данных параметрических скважин.

В работе исследователя Бричевой С.С. представлены результаты исследований признаков наличия жильного льда в разрезе по данным георадиолокации на Янском плоскогорье вблизи термокарстового провала Батагайка. Исследователями был применен георадар ОКО-2 (ЛОГИС-ГЕОТЕХ, Россия) с антенным блоком 250 МГц. Применение метода георадиолокации позволяет оперативно выявлять положение кровли многолетнемерзлых пород, однако картирование повторно-жильного льда представляет трудности. В данной работе представлен результат использования как кинематических, так и динамических атрибутов радарограммы для выявления полигонально-жильного льда [46].

В работе Соколова К.О. были представлены результаты применения метода георадиолокации с целью обнаружения и оценки пластового льда в мерзлом горном массиве. Для изучения особенностей георадарных сигналов, полученных при исследовании подземных льдов, была создана модель одиночного георадарного сигнала структуры "мерзлая порода-лед-мерзлая порода". В

результате исследования были выявлены закономерности в кинематических и динамических характеристиках георадарных сигналов на верхней и нижней границах массивного льда в зависимости от его геометрических параметров. Эти особенности были подтверждены результатами компьютерного и физического моделирования георадарных измерений на модели мерзлого горного массива. Одним из основных результатов исследования стало выработка комплекса критериев идентификации пластового льда на основе данных георадарных измерений. Разработанные критерии позволят использовать георадары для более детального изучения структуры многолетнемерзлых пород с целью предотвращения развития опасных криогенных процессов в неприкосновенных и городских районах Арктики [41,45].

В 2021 г. в работах исследователей Тумского В. Е., Едемского Д. Е., Прокоповича И. В. и др. приведены результаты георадиолокационного зондирования верхней части толщи мерзлых пород в области развития полигонального микрорельефа в Арктике с помощью георадара «Лоза-В» [48,57]. Работы проводились на западном и восточном побережье полуострова Таймыр, а также на западном берегу острова Котельный (архипелаг Новосибирские острова). На обследованных участках полигональный микрорельеф находится на нисходящей стадии развития. Георадарные профили были проложены через центральные части полигонов и поперек вытаявающих ледяных жил. Дополнительно были получены сведения о геологическом строении разреза отложений и определены характеристики сезонно-талого слоя. В программе *gprMax* выполнено моделирование возможной структуры полигонально-жильных льдов на георадарных профилях. На основе сопоставления полевых и модельных данных сделана интерпретация результатов георадиолокационного зондирования, что позволило установить структуру центральной части полигонов и отложений, перекрывающих вытаявшие ледяные жилы. Показана возможность использования спектра волновых форм для интерпретации результатов, определены скорости распространения электромагнитных волн в изученных отложениях.

## ВЫВОДЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналитический обзор показал, что методы геофизики успешно применяются для изучения некоторых видов подземных льдов, однако в настоящее время не проводились исследования по выявлению незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород и, соответственно, слабо выраженных в рельефе местности. При исследовании повторно-жильного льда в массиве мёрзлых горных пород методом георадиолокации существует проблема однозначной интерпретации данных, так как структура георадиолокационной волновой картины ПЖЛ схожа со структурами волновых картин от других неоднородностей массива горных пород.

Таким образом, для определения наличия в составе вскрышных пород (торфов) повторно-жильных льдов, не прослеживаемых визуально термокарстовыми проявлениями, сформулирована цель - разработать методику, позволяющую выявлять и картировать ПЖЛ в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны методом георадиолокации.

Цель работы обусловила необходимость решения следующих задач:

- 1) выполнить аналитический обзор геокриологических условий разработки россыпных месторождений криолитозоны;
- 2) создать физико-геологическую модель массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ и на её основе провести компьютерное и физическое моделирование георадиолокационных измерений;
- 3) обосновать георадиолокационные признаки выявления незатронутых термокарстом ПЖЛ в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны;
- 4) разработать методику картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород методом георадиолокации;
- 5) апробировать разработанную методику при эксплуатационной разведке россыпных месторождений криолитозоны.

## 2 Особенности распространения высокочастотной электромагнитной волны в массиве горных пород с включением ПЖЛ

### 2.1 Физико-геологическая модель массива мерзлых горных пород с включением льда

Для выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород методом георадиолокации необходимо разработать ее физико-геологическую модель (ФГМ). Под ФГМ понимается обобщенное и формализованное описание пространственно-временной структуры геологических и геофизических полей и параметров, с определенной степенью вероятности отражающей реальные инженерно-геологические объекты, например, ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород. Описание ФГМ складывается из: 1) геометрических параметров геологических тел, иначе говоря, их размеров, формы и глубины залегания; 2) физических свойств и состояния горных пород; 3) особенностей физических полей, присущих данному массиву; 4) влияния помех геологического и негеологического происхождения. Необходимо стремиться к выбору наиболее простой и обобщенной модели, предоставляющей по возможности полно описать естественные условия и ограничить неопределенность решения обратной задачи [12,58].

По результатам анализа ранее проведенных геокриологических исследований массивов горных пород россыпных месторождений криолитозоны установлено, что в них ПЖЛ имеют форму в виде вертикального столба [7]. В четвертичных аллювиальных отложениях, чехол рыхлых отложений характеризуется наличием в разрезе ПЖЛ, залежей пластовых льдов и линз льдогрунта (рисунок 2.1). Повсеместное распространение в отложениях террас имеют ПЖЛ, мощность которых, как правило, контролируется мощностью аллювия и его составом. Характерной особенностью криогенного

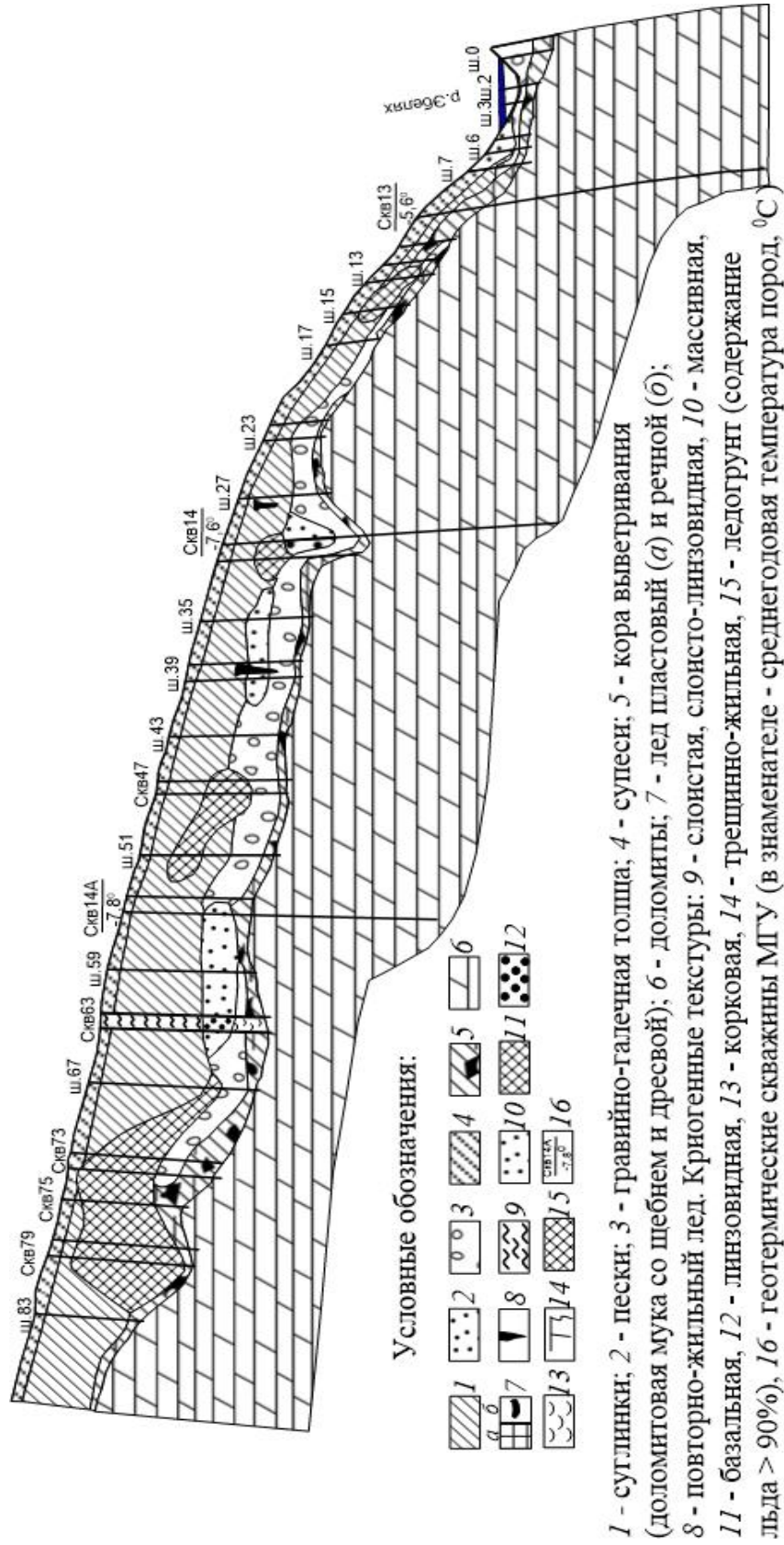


Рисунок 2.1 – Криолитологический разрез по правому берегу р. Эбелях



строения является развитие ПЖЛ не только тонкодисперсных, но и грубодисперсных (песчаных) отложениях. Для плохо дренируемых, заболоченных водораздельных поверхностей низких пластовых плато наиболее характерно двухслойное строение рыхлого покрова. Верхняя часть разреза мощностью до 4 м представлена сильнольдистыми пылеватыми суглинками и супесями, нередко оторфованными, с плохо разложившимися растительными остатками и единичными включениями дресвы и щебня коренных пород. Льдистость отложений составляет 30 – 50 %. Нижняя часть разреза мощностью 5 – 6 м представлена льдистыми супесями и суглинками, вмещающими повторно-жильные и пластовые льды. Мощность ПЖЛ контролируется мощностью супесчано-суглинистых отложений, на площадях развития карстовых и карстово-эрозионных депрессий достигает до 8 – 9 м.

По публикациям о результатах применения геофизических методов в криолитозоне (Якупова В. С., Фролова А. Д., Седова Б. М. и др.) [17-19], данным полевых и лабораторных экспериментов, проведенных сотрудниками лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН, выполнен анализ геофизических свойств горных пород в пределах Субарктической климатической зоны Якутии. Как отмечено выше, геофизические свойства горных пород деятельного слоя приведены по данным электроразведки, сейсморазведки и георадиолокации. Приведены свойства удельного кажущегося сопротивления –  $\rho_k$  (Ом\*м); скорости распространения упругих продольных волн –  $V_p$  (м/с); скорости распространения электромагнитных волн –  $V$  (м/нс).

Электрофизические характеристики определены по электроразведочным исследованиям, проводившимся в 2006-2007 гг. сотрудниками отдела геофизики АО «Алмазы Анабара» на стадии поисково-разведочных работ на участках аномальных объектах 10/84, 11/84, 13/84, 14/84 бассейна р. Кюрюктюр россыпного месторождения алмазов «Маят-Водораздельный» [5]. Электроразведочные данные на участках «10», «11», «13», «14/84» россыпного месторождения алмазов «Маят-Водораздельный», полученные в результате проведения полевых геофизических работ методом дипольного

электромагнитного профилирования (ДЭМП) на разnose 40 м при частоте  $f = 1125$  кГц, представлены на рисунке 2.2. Выявлены 4 аномальные зоны, характеризующиеся пониженными значениями электрических сопротивлений, которые изменяются от 214 до 781 Ом\*м согласно данным ДЭМП. Поглощающие породы низкой электрической проводимости обнаружены на поверхности, в то время как коренные породы (доломиты) перекрыты рыхлыми отложениями до 5-10 м, согласно данным бурения. Максимальная глубина выявленных аномалий составляет 40 м, а минимальная мощность отдельных слоев – 0,5 м.

В таблице 2.1 приведены значения удельного электрического сопротивления горных пород по данным работ А. Т. Акимова, А. Н. Боголюбова, А.Д. Фролова и др. [18,59-61] в районах субарктической климатической зоны Якутии, по результатам полевых исследований методами электроразведки на постоянном токе.

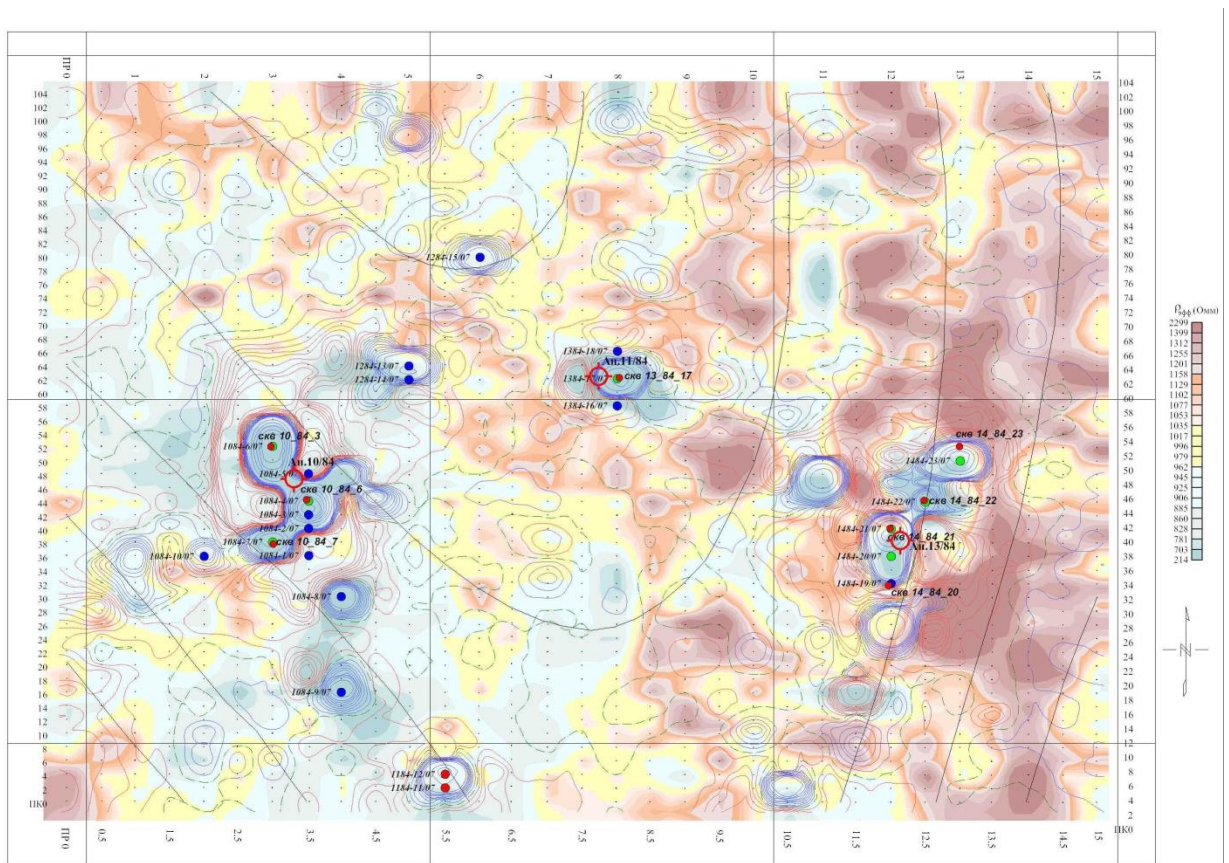


Рисунок 2.2 – План эффективных сопротивлений по ДЭМП на разnose  $r = 40$  м, на частоте  $f = 1125$  кГц

Таблица 2.1 – Удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ) талых и мёрзлых пород в естественном залегании

Породы	$\rho$ , Ом*м		Температура мёрзлых пород, $t$ °С
	талые	мёрзлые	
Пески с прослоями суглинков и включениями гравия	100 ÷ 120	700 ÷ 1000	-0,5
Щебень, гравий	70 ÷ 180	$3 \cdot 10^3 \div 15 \cdot 10^3$	-1 ÷ -5

Приведенные в таблице данные хорошо согласуются с результатами многочисленных полевых исследований на постоянном токе, выполненных в криолитозоне Якуповым В. С. [28]. На рисунке 2.3 представлены графики зависимости между удельным электрическим сопротивлением и относительной диэлектрической проницаемостью. Графики составлены по электрофизическим свойствам мерзлых горных пород Якутской алмазоносной провинции.

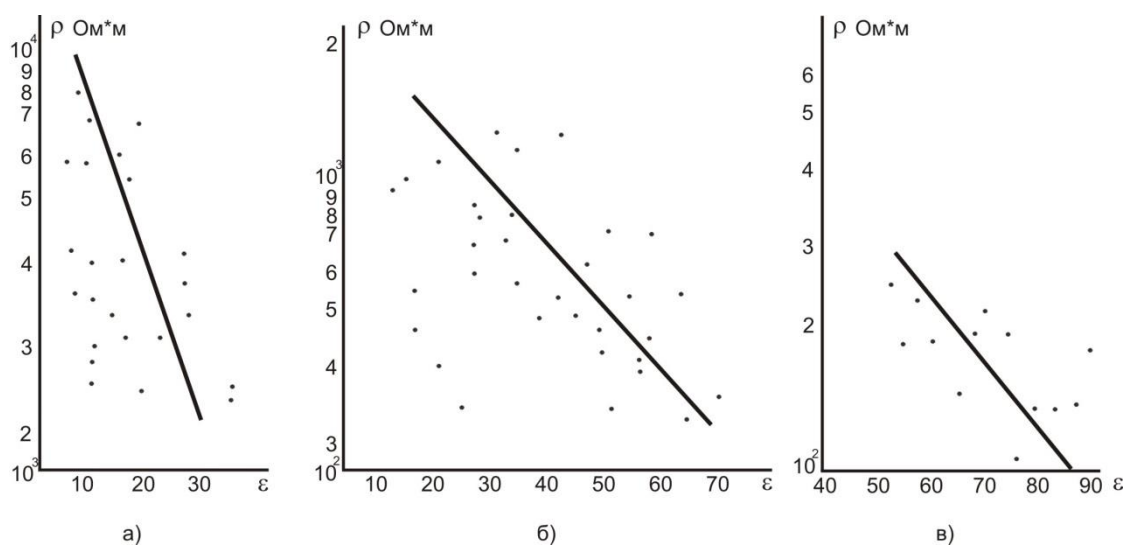


Рисунок 2.3 – Удельное электрическое сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость мёрзлых горных пород

Якутской алмазоносной провинции:

а) 1 группа, б) 2 группа, в) 3 группа

Первая группа (рисунок 2.3 а) включает в себя мёрзлые породы с малой удельной поверхностью, насыщенные пресной водой. Их удельное электрическое сопротивление составляет от 2000 до 10000 Ом\*м, а относительная диэлектрическая проницаемость варьируется в пределах от 5 до 30. К ним можно отнести глинистые отложения в мёрзлом виде. Группу номер два (рисунок 2.3 б) формируют мёрзлые микропористые породы, например, мергели и кимберлиты, а также возможные талые глинистые отложения. Их удельное электрическое сопротивление находится в диапазоне 300-1500 Ом\*м, при диэлектрической проницаемости от 20 до 70. Третья группа (рисунок 2.3 в) представлена породами с удельным электрическим сопротивлением меньше 300 Ом\*м и диэлектрической проницаемостью между 50 и 80. Предполагается, что это засоленные породы различного литолого-петрографического состава, в основном грубокластические и микропористые.

Скорости распространения электромагнитных волн ( $V$ , м/нс) в мерзлых горных породах верхней части разреза Якутской алмазоносной провинции («Маят-Водораздельный», «Новогодний», «р. М. Куонамка», «р. Молодо») измерены в естественном залегании методом георадиолокации [62-70]. Георадиолокационные исследования производились георадаром «ОКО-2», с антенной АБДЛ «Тритон» (центральная частота 50 МГц). Для параметрических измерений методом общей глубинной точки (ОГТ) георадар использовался с антенной АБ-150 (центральная частота 150 МГц) [71-73].

Определение электрофизических свойств мерзлых горных пород методом георадиолокации на исследуемой площади проводилось несколькими способами [74-84].

Первый способ базируется на вычислении скорости через анализ годографов дифрагированных волн, возникающих из-за локальных изменений в структуре мерзлых горных пород. Электрофизические характеристики среды определяются по методике, предусмотренной процедурой «Гипербола», включенной в программное обеспечение GeoScan32. Для достижения оптимального соответствия на теоретической гиперболе с осью синфазности

дифрагированной волны, параметры корректируются на радарограмме (рисунок 2.3а). Это включает вычисление скорости волн в слое от поверхности до дифрагирующего элемента, а также диэлектрических характеристик среды и глубины неоднородности, где в данном участке скорость среза составляет  $V = 0,09$  м/нс ( $\epsilon' = 11,1$ ).

Второй способ основан на анализе результатов наблюдений на переменной базе приемной и передающей антенн с применением уравнения годографа отраженной волны (ОГТ). Технически этот подход может быть реализован в системе обработки данных аналогично предыдущему способу, за исключением того, что теоретическая гипербола строится на основе уравнения годографа для отраженной, а не дифрагированной волны. Для выполнения этой задачи был использован георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150. Разборная конструкция антенного блока позволяет реализовывать методику работы на переменной базе. Зондирования проводились вблизи разведочных скважин. В результате зондирований по методике ОГТ с разносом антенн определяется скорость по разрезу -  $V$  и диэлектрическая проницаемость -  $\epsilon'$  исследуемой среды. Пример полученного годографа приведен на рисунке 2.4 б. На этом участке рассчитана скорость по разрезу  $V = 0,150$  м/нс ( $\epsilon' = 4$ ).

Следующий способ определения свойств разреза заключается в сопоставлении данных георадиолокации с данными геологических скважин. Для расчета скорости распространения электромагнитной волны ( $V$ ) и, следовательно, диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) для данного слоя, используются известная мощность слоя и время прихода отраженной волны. Значение скорости распространения электромагнитных волн в вакууме обозначается как  $c$ . Тогда формула для расчета диэлектрической проницаемости будет:  $\sqrt{\epsilon'} = \frac{c}{V}$ .

Таким образом, на участке северной части Якутской алмазоносной провинции определены электрофизические свойства мерзлых горных пород в естественном залегании и представлены в таблице 2.2. В результате диэлектрическая проницаемость пород верхней части разреза имеет значение от 4

(0,15 м/нс) до 10,9 (0,09 м/нс), что полностью соответствует исходной геолого-геофизической информации о породах с участка.

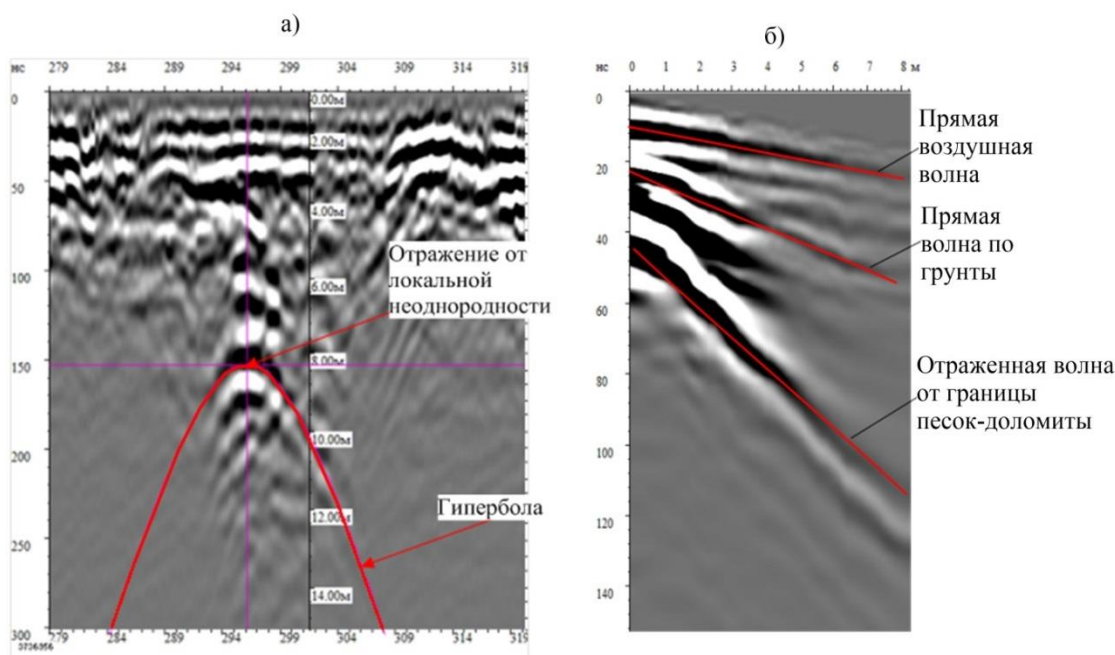


Рисунок 2.4 – Примеры сопоставления теоретической гиперболы с осью синфазности дифрагированной волны от локального объекта (а) и по голографам отраженных волн (б)

Для разработки ФГМ повторно-жильного льда в массиве мерзлых горных пород на основе априорной геологической и геофизической информации проведено компьютерное моделирование в системе grMax методом FDTD (метод конечных разностей во временной области). На рисунке 2.5 а представлена схема модели ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород, представляющая с собой двухслойную среду, состоящую из мёрзлых суглинков с включением льда вертикальной формы и коренных пород, представленных доломитами. Также на рисунке указаны значения вещественной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) пород. Исходные данные для ПО grMax, такие как параметры георадара с антенным блоком АБ-250 (с центральной частотой 250 МГц) заданы, как указано выше в подразделе 2.1.

Таблица 2.2 – Геофизические свойства дисперсных пород для субарктической климатической зоны

Участки исследования	Электроразведка, $\rho_k, \text{ Ом*м}$		Георадиолокация $V, \text{ м/нс}$		Горные породы
	талые	мерзлые	талые	мерзлые	
р. Молодо Уч. Горнотех. сооружение			-	0,144- 0,169	Щебень, гравий
	$0,3*10^3$	$0,6*10^3 -$ $1,5*10^3$	-	0,146- 0,133	Глинистые отложения
р. Маят Уч. Новогодний		$1,2*10^3 -$ $4*10^3$	-	0,158- 0,127	Глинистые отложения
	$0,8*10^3 -$ $10^3$		-	0,160 - 0,157	Песок
уч. 405	$3*10^2 -$ $0,9*10^3$	$3,5*10^3 -$ $7*10^3$	0,076- 0,092	0,106- 0,169	Глинистые отложения
уч. Верхняя Кула	$0,16*10^3 -$ $0,46*10^3$		0,069- 0,087	0,106- 0,148	Глинистые отложения
Уч. р. М. Куонамка			-	0,146	Мелко- среднезернист ый песок
			-	0,045	Глинистые сланцы

На рисунке 2.5 б представлен результат моделирования в виде синтетической георадиолокационной радарограммы. На ней ярко проявляются оси синфазности гиперболической формы от углов льда, как от верхней, так и от нижней границ.

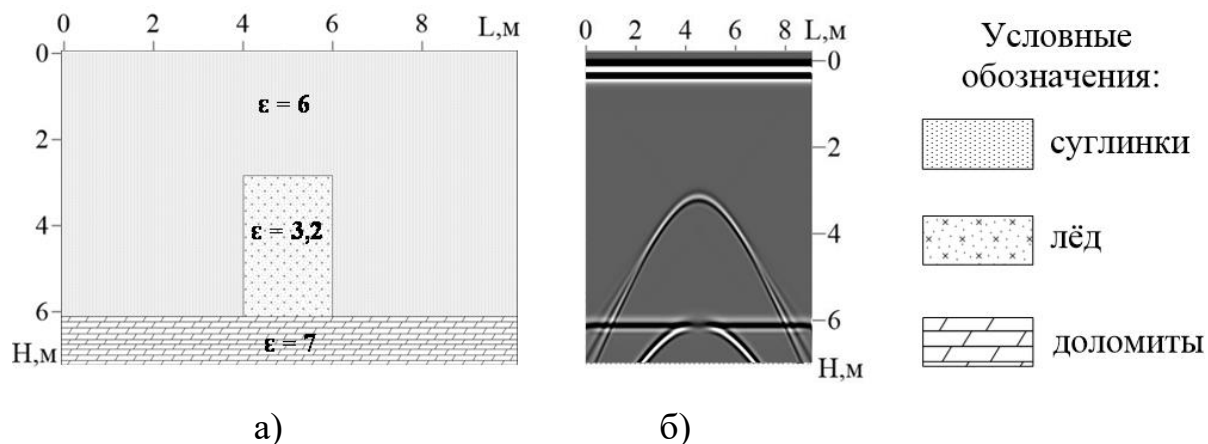


Рисунок 2.5 – Физико-геологическая модель (ФГМ) массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ: а) схема ФГМ с диэлектрической проницаемостью горных пород; б) синтетическая георадиолокационная радарограмма.

В зависимости от ширины льда и длины волны излучаемой георадаром количество гипербол снижается до одной, т.к. происходит наложение друг на друга. В случае если подстилающая среда представлена галечными отложениями, то на радарограмме присутствуют многочисленные гиперболы, маскирующие гиперболическую ось синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от нижней границы льда. На радарограммах, полученных в естественных условиях, годографы дифрагированных волн не всегда четко выделяются, особенно от нижних границ ПЖЛ. Это связано с тем, что "чистый" лед имеет диэлектрическую проницаемость близкую к вмещающей среде. Таким образом, присутствие тонких слоев суглинков, супесей в строении ПЖЛ, влияет на прохождение георадиолокационных сигналов через него, при этом постепенно затухают. Для определения особенностей проявления ПЖЛ в



георадиолокационных волновых полях проведено компьютерное и физическое моделирование георадиолокационных измерений массива горных пород криолитозоны с различными параметрами (геометрические размеры, глубина залегания, диэлектрическая проницаемость) для последующего анализа и обобщения характеристик волновых полей.

## 2.2 Математическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением льда

Для георадиолокационного компьютерного моделирования измерений в массивах горных пород применяются многие вычислительные методы. Однако метод конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain, FDTD) занимает лидирующее положение. Множество статей и монографий [85,86] содержат подробное теоретическое и практическое основание этого метода. В 1966 году К. Йи (К. Yee) [87] представил численный подход к решению уравнений Максвелла (1, 2), базирующийся на мгновенных значениях напряженностей электромагнитного поля (ЭМП) через метод конечных разностей. В современном виде уравнения Максвелла выглядят так:

$$\nabla \times H(r, t) = \frac{\partial D(r, t)}{\partial t} + J(r, t) \quad (1)$$

$$\nabla \times E(r, t) = - \frac{\partial B(r, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $E$  и  $H$  – векторы напряженности электрического и магнитного полей,  $D$  и  $B$  – векторы электрической и магнитной индукции,  $J$  – плотность электрического тока,  $r$  – радиус – вектор точки наблюдения (точки, в которой рассчитывается ЭМП),  $t$  – время.

Метод заключается в разделении трёхмерного пространства, где происходит расчет распространения электромагнитного поля, на базовые объемы (ячейки Йи — Yee cells) с интервалами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  (рисунок 2.6а). Сетки для полей  $E$  и  $H$  имеют смещение в пространстве и времени друг относительно друга на половину

интервала для каждой координаты (рисунок 2.6б). При этом расчеты на каждом новом этапе основаны на данных с предыдущего этапа [88].

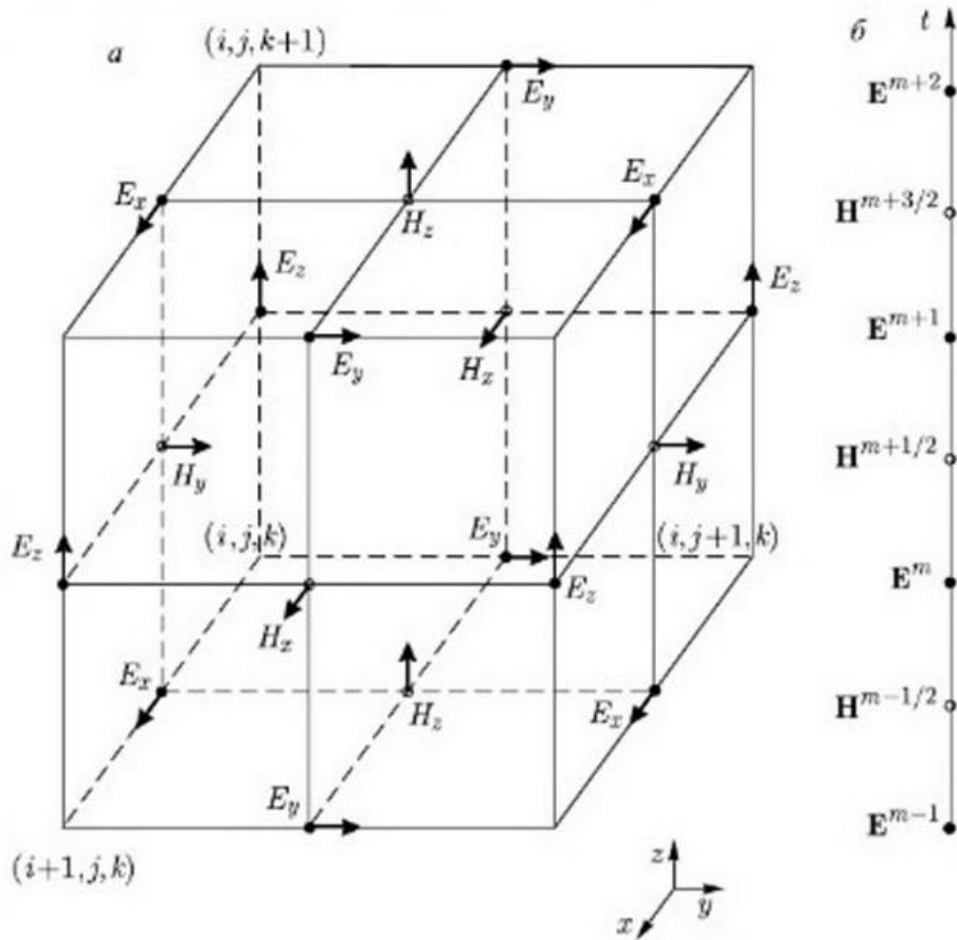


Рисунок 2.6 – Ячейка трехмерной пространственной сетки  
в декартовой системе координат

Работа программного обеспечения (ПО) `grMax` основывается на применении данного метода, который был создан К. Уорреном (C. Warren) [89] и А. Джианопулосом (Antonis Giannopoulos) [90]. ПО `grMax` был впервые представлен в 1996 году на языке программирования C. Теперь этот проект переписан на Python и является кросс-платформенным, совместимым с операционными системами Microsoft Windows, Mac OS X и Linux. Отметим, что у ПО `grMax` отсутствует оконный графический интерфейс, и пользователь взаимодействует с ним через командную строку. Для моделирования необходимо заранее подготовить исходные данные в текстовом файле с расширением \*.in.

В пакете присутствуют библиотеки антенн и материалов, которые представлены моделями воздуха и идеального проводника. Для определения реалистичных характеристик грунта существует несколько функций. С помощью ПО gprMax можно моделировать либо одну трассу (А-сканирование), либо радарограмму, состоящую из набора трасс (В-сканирование).

Данные для моделирования включают в себя геометрические параметры модели, дискретизацию по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , электрофизические свойства материалов, а также тип и параметры источников электромагнитного поля, такие как тип антенны, амплитуду и центральную частоту зондирующего импульса, а также продолжительность временного окна для моделирования. В зависимости от размеров моделируемого объекта можно использовать георадары с различными частотами, включая высокочастотные (1200 МГц) и низкочастотные антенны (50 МГц).

При моделировании создается или единый файл с расширением \*.out (для А-сканирования), или серия файлов \*.out (для В-сканирования). Результаты моделирования в графическом виде можно изобразить либо как графики составляющих напряженностей электрического и магнитного полей по координатам, либо как радарограмму. Необходимо подчеркнуть, что метод FDTD требователен к ресурсам: при небольшом шаге сетки и большой модели необходим большой объем ОЗУ (оперативной памяти) и высокопроизводительный, центральный или графический процессор.

Компьютерное моделирование распространения СШП-импульсов георадара в модели массива мерзлых горных пород с включением ПЖЛ было выполнено в ПО gprMax. Для моделирования используются следующие исходные данные: ширина и мощность льдов, электрофизические параметры горных пород, составляющих модель, тип антенного устройства георадара, характеристики зондирующего импульса, включая форму, длительность и амплитуду, а также расстояние между приемной и передающей антеннами, известное как база измерений.

Исследуемый массив горных пород с включением ПЖЛ представлен в виде

слоистой среды, посередине которой залегает лёд вертикальной формы, параметры, приведены в таблице 2.3 [18].

Таблица 2.3 – Характеристика слоев модели массива горных пород с включением льда

№ слоя	Горная порода	Удельная электрическая проводимость, См/м	Диэлектрическая проницаемость	Толщина слоя, м
1	Песок речной, мерзлый	0,0002	4	4,0
	Лёд (чистый)	$1,67 \cdot 10^{-6}$	3,2	3,0
2	Песок горный, мерзлый	0,001	5	2,0

На рисунке 2.7 изображены форма и спектр зондирующего георадиолокационного сигнала, используемого в моделировании. Импульс этого сигнала имеет центральную частоту 400 МГц, амплитуду 104 о.е. и длительность периода в 2,5 нс. Используемые передающая и приемная антенны являются дипольными, и их база измерений равна 0,38 м.

После того как все требуемые параметры определены и вычислены, формируется входной файл, после чего начинается процесс моделирования А-сканирования. Результаты этого можно увидеть на рисунке 2.8, где отображены зондирующий сигнал (5-10 нс) и отраженные волны от границ различных сред (17-22 нс, 54-58 нс) с разными показателями диэлектрической проницаемости.

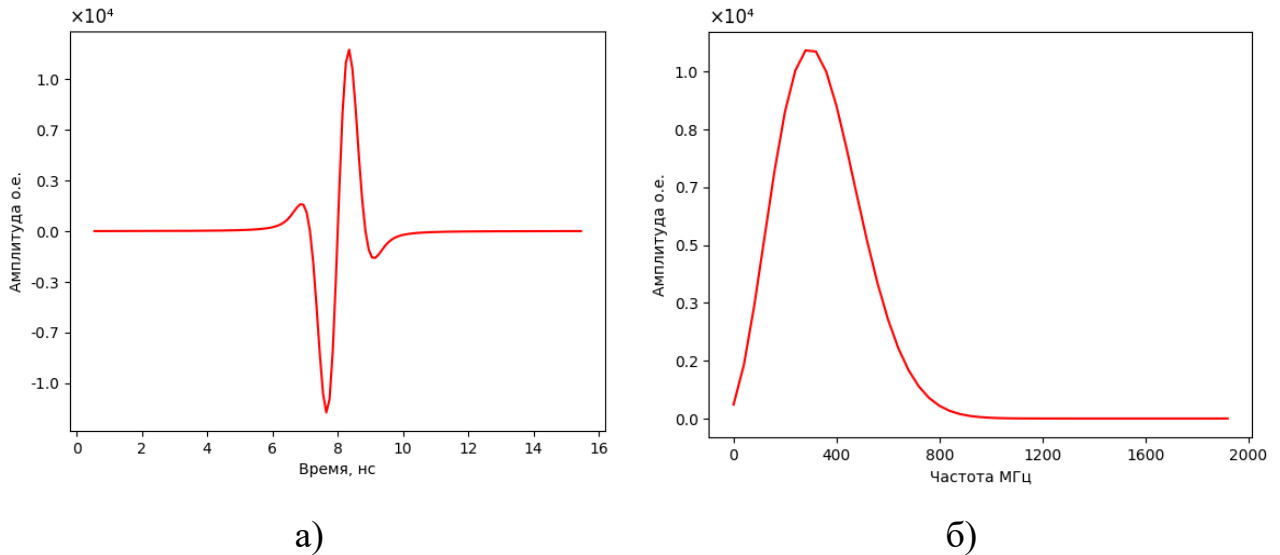


Рисунок 2.7 – Форма (а) и спектр (б) зондирующего импульса георадара используемого в модели

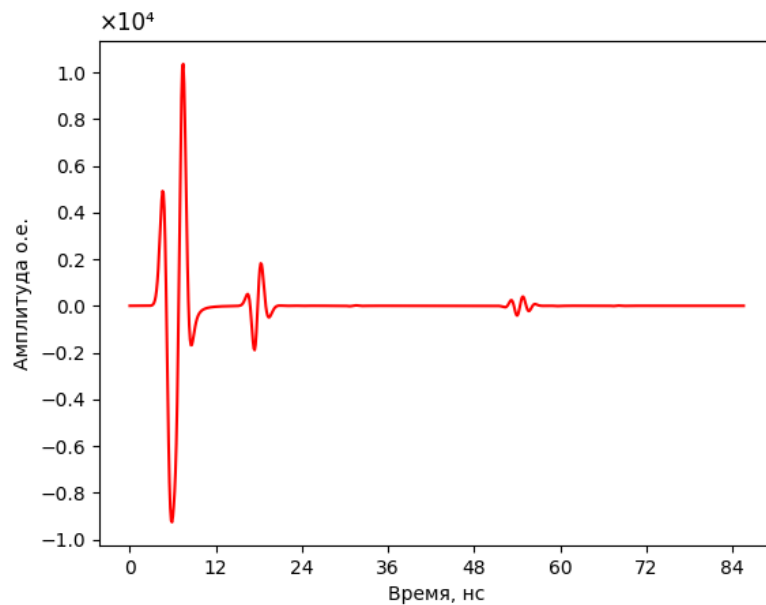


Рисунок 2.8 – Результат моделирования одиночной трассы

Далее, проводилось моделирование В-сканирования с интервалом 0,022 м между георадиолокационными трассами (рисунок 2.8). Результат моделирования В-сканирования полученный при передвижении георадара вдоль объекта исследования представлен в виде радарограммы. На рисунке 2.9а изображена схема модели МГП с ПЖЛ форм «вертикального столба», залегающего в массиве мерзлых песков на глубине 1м, мощностью 3м и шириной 0,5 м, основание

представлено мерзлыми горными песками. На рисунке 2.9б расположена синтетическая радарограмма, полученная по этой модели. Отчетливо видны два гиперболических отражения от двух верхних углов льда на 17 нс и в районе 55 нс ярко прослеживаются от нижних углов ПЖЛ. Слабые гиперболические отражения проявляются на 31 нс и 68 нс – кратные отражения от верхних и нижних границ ПЖЛ соответственно.

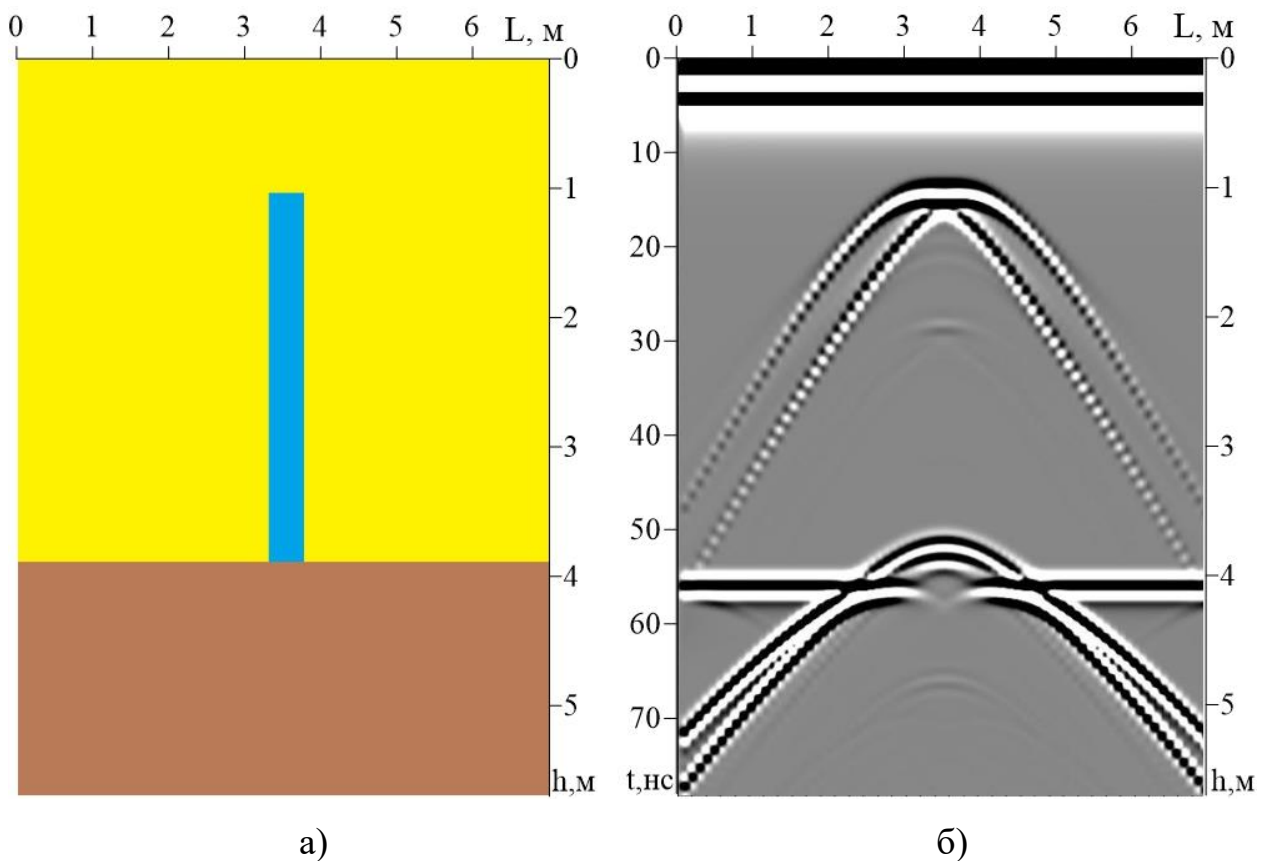


Рисунок 2.9 – Исходные данные и результат моделирования В-сканирования:

а) схема модели (объекта); б) синтетическая радарограмма

Если на пути распространения электромагнитной волны встречается локальная неоднородность, свойства которой (импеданс) существенно отличаются от свойств вмещающей среды, а размеры сравнимы или в несколько раз меньше длины волны ( $1/4\lambda - \lambda$ ), то это неоднородность будет источником дифрагированной волны. В случае георадиолокации источниками дифракции могут быть как изометричные объекты, например, моренные валуны, так и

линейно вытянутые, в случае, когда они расположены перпендикулярно профилю: трубопроводы, кабели под напряжением. Как и в сейморазведке, дифрагированные волны образуются на «острых краях полуплоскости» [91]: вертикальных уступах, вертикальных контактах, сбросах. «Острым краем полуплоскости» может быть не только геологическая структура, но и край погребенного фундамента, границы коллектора в грунте, а также включение жильного льда в массиве мерзлых горных пород [92]. Схематично образование дифрагированной волны и ее годограф изображены на рисунке 2.10. При этом явление дифракции важно в георадиолокационном методе, т.к. поиск объектов вертикальной формы зачастую сводится к поиску осей синфазности дифрагированных волн на георадарных данных [93].

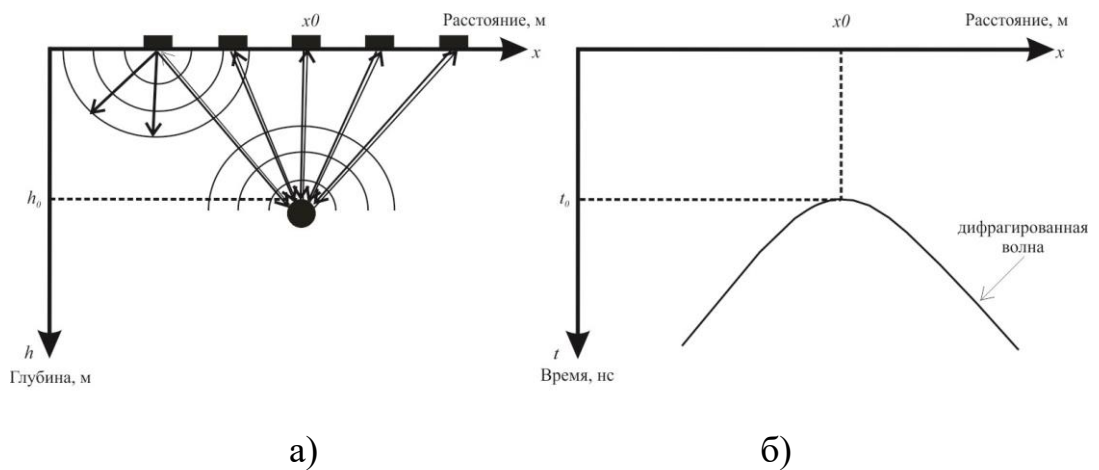
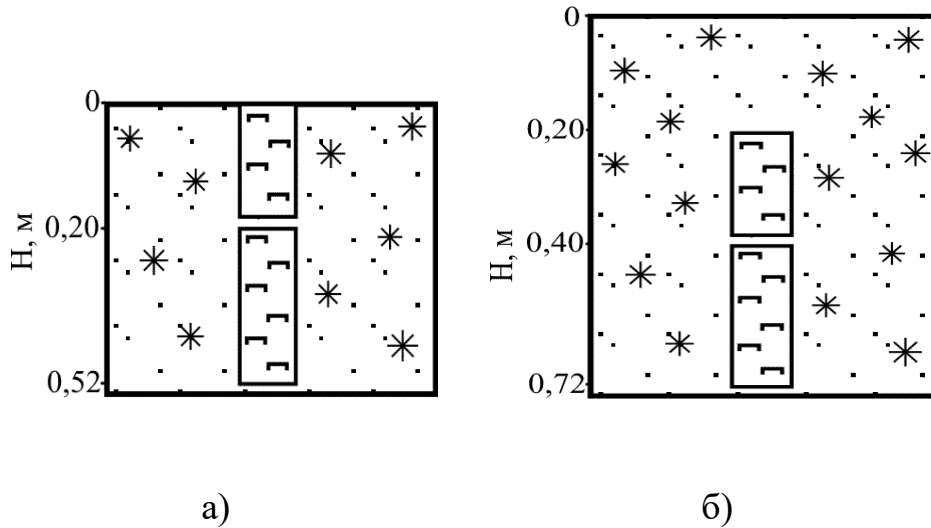


Рисунок 2.10 – Схема образования дифрагированной электромагнитной волны от локального объекта, залегающего на глубине  $h_0$ :

а) глубинный разрез; б) годограф дифрагированной волны.

Далее проведено моделирование ПЖЛ в массиве мерзлых песков, состоящих из двух кусков льда, зондирующим сигналом являлся импульс Рикера с частотой 1200 МГц, где рассчитываются траектории сигналов, их временные и частотные характеристики и формируют из них радарограмму. Модель состояла из двух льдов шириной 0,15 м и высотой 0,20 и 0,32 м. Затем добавляли отсыпку до 0,2 м с шагом 0,05 м (рисунок 2.11). На рисунке 2.12 показаны синтетические

радарограммы, на каждой из которых отображаются три гиперболические оси синфазности, дифрагированные на верхней кромке льда (1), границе между кусками льда (2) и от нижней границы льда (3). Гиперболы имеют различную ширину раскрытия, которая увеличивается с глубиной, что связано с увеличением первой зоны Френеля для распространяющейся электромагнитной волны.



Условные обозначения:

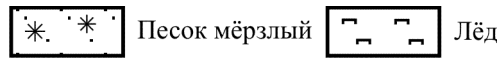


Рисунок 2.11 – Схема геологического разреза ПЖЛ:

а) без отсыпки; б) с отсыпкой 0,2 м.

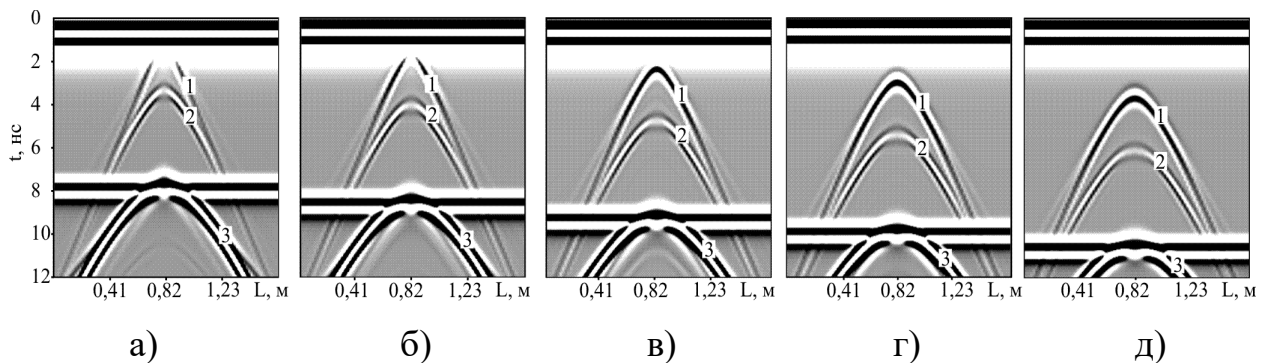


Рисунок 2.12 – Синтетические георадиолокационные разрезы ПЖЛ

с отсыпкой: а) 0 м; б) 0,05 м; в) 0,1 м; г) 0,15 м; д) 0,2 м.



При помощи моделирования в ПО grgMax установлена структура георадиолокационного волнового поля для ПЖЛ в массиве мерзлых песков, которая может быть получена также при наличии в мерзлых горных породах крупных валунов. Для однозначной интерпретации полученных результатов необходимо учитывать спектральные характеристики, которые в grgMax, к сожалению не учитываются. Следовательно, необходимо применять другой метод, который имеет возможность учитывать эти характеристики при моделировании ПЖЛ в массиве мерзлых песков. Для решения этой задачи сотрудниками лаборатории георадиолокации разработано программное обеспечение «Двухмерная лучевая модель зондирования неоднородной среды георадиолокаторами серии «ОКО»», которое состоит в Реестре программ для ЭВМ [94].

Как и FDTD, квазиоптические методы расчета, такие как однородная теория дифракции (UTD), метод лучей (геометрическая оптика) и некоторые другие методы, также нашли достаточно широкое применение [94,97]. Они менее трудоемки, но и менее точны. Метод матрицы линий передачи (TLM) был предложен в 1971 г. Джонсом и Берле для решения двухмерных задач электродинамики [98]. В отличие от методов, основу которых составляют уравнения Максвелла, метод TLM базируется на принципе Гюйгенса, согласно которому огибающая фронтов волн образует новый волновой фронт, на котором также расположены вторичные источники. Таким образом, реализуется концепция ближкодействия. Если пренебречь длиной волны, то распространение ЭМВ можно описывать с помощью отдельных лучей, а не на языке волновых фронтов. Геометрический луч на языке векторов можно рассматривать как вектор Пойнтинга электромагнитного поля. Рассматриваются только параксиальные лучи, которые при своем распространении остаются близкими к ее оси симметрии и почти параллельными ей. Поэтому они близки к электромагнитным квази-Т-волнам. Тогда можно, как в работе [94], ввести ABCD-матрицы передачи для расчета сигналов.

Для представления двумерной слоистой среды, в которой распространяются квази Т-волны, предлагается метод дифференциальных ABCD-матриц.

Первое дифференциальное уравнение Максвелла обеспечивает связь между элементами, включенными в него, в каждой точке пространства. Это уравнение отражает физическую реальность, согласно которой любой вид электрического тока сопровождается присутствием ассоциированного с ним магнитного поля [99].

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \delta + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

Второе дифференциальное уравнение Максвелла применимо во всех точках пространства. Оно формулирует следующую физическую закономерность: изменение магнитного поля во времени сопровождается существованием связанного с ним электрического поля.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

Запишем систему уравнений, устанавливающую связь между этими векторами электромагнитного поля.

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \delta + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial B}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

Данная пара векторных равенств представляет связь и корреляцию между изменениями в электрическом и магнитном полях, а также определяет роторы векторов электромагнитного поля. В качестве материальных уравнений используются соотношения:

$$D = \varepsilon_a \varepsilon_o E; B = \mu_a \mu_o H; \delta = \sigma E, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_o = \left(\frac{1}{36\pi}\right) * 10^{-9}$  Ф/м и  $\mu_o = 4\pi * 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{\text{м}}$  – электрическая и магнитная постоянные;  $\varepsilon_a$  и  $\mu_a$  – относительные диэлектрическая и магнитная комплексные проницаемости вещества.

Подставив (6) в систему уравнений (5), получим уравнения Максвелла в следующем виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma E + \varepsilon_a \varepsilon_o \frac{\partial E}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_a \mu_o \frac{\partial H}{\partial t} \end{cases} \quad (7)$$

Для перехода к расчетам в частотной области вместо временной необходимо использовать комплексные амплитуды и комплексные значения диэлектрической и магнитной проницаемости.

Мгновенное значение любой скалярной величины  $a$ , характеризующей монохроматический процесс, имеет вид:

$$a(t) = A_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Мгновенное значение любой векторной величины  $A$  может быть выражено в ортогональной системе координат  $u, v, w$  через скалярные составляющие следующим образом:

$$\begin{aligned} A(t) = u^0 A_{vm} \cos(\omega t + \varphi_u) + v^0 A_{vm} \cos(\omega t + \varphi_v) + \\ + w^0 A_{wm} \cos(\omega t + \varphi_w) \end{aligned} \quad (9)$$

В этих формулах  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  – угловая частота гармонических колебаний,  $f$  – частота колебаний,  $T$  – период колебаний,  $A_{vm}, A_{vm}, A_{wm}, A_m$  – амплитуды, являющиеся функциями пространственных координат  $u, v, w$ ;  $\varphi_v, \varphi_w, \varphi_u, \varphi$  – начальные фазы, также являющиеся функциями этих координат. Согласно формуле Эйлера:

$$\cos(\omega t + \varphi) + i \sin(\omega t + \varphi) = e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (10)$$

Мгновенные значения скаляра  $a$  и вектора  $A$  определяются вещественной частью комплексного выражения мгновенного значения соответствующей величины:

$$a(t) = \operatorname{Re}(\dot{A}e^{i\omega t}); A(t) = \operatorname{Re}(\dot{A}e^{i\omega t}) \quad (11)$$

Точка над буквами ставится для обозначения комплексных амплитуд. Уравнение, включающее только линейные операции над мгновенными значениями монохроматических переменных, сохраняет свою действительность и для комплексных выражений мгновенных значений.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\dot{A}e^{i\omega t}) = i\omega \dot{A}e^{i\omega t} \quad (12)$$

При работе с монохроматическим процессом в системе (7), заменяя мгновенные значения на комплексные выражения этих мгновенных значений, используя равенство (12) и сокращая полученные соотношения на фактор  $e^{i\omega t}$ , преобразуем их в соответствующие уравнения для комплексных амплитуд:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + i\omega \varepsilon_a \varepsilon_o \vec{E} \\ \text{rot } \vec{E} = -i\omega \mu_a \mu_o \vec{H} \end{cases} \quad (13)$$

Также введем такие понятия, как комплексная проводимость  $\dot{Y}$  и комплексное сопротивление  $\dot{Z}$  среды:

$$\dot{Y} = i\omega \varepsilon_a \varepsilon_o + \sigma; \quad \dot{Z} = i\omega \mu_a \mu_o \quad (14)$$

Подставив (14) в систему уравнений (13), получим уравнения Максвелла в следующем виде:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = \dot{Y} \vec{E} \\ \text{rot } \vec{E} = -\dot{Z} \vec{H} \end{cases} \quad (15)$$

Проводимость  $\sigma$  учитывает только тепловые потери, но не учитывает релаксационные потери. Комплексную проводимость  $\dot{Y}$  с учетом релаксационных потерь можно записать так:

$$\dot{Y} = i\omega \varepsilon_o \left( \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{ст} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega \tau_{рел}} + \frac{\sigma_{ст}}{i\omega \varepsilon_o} \right) \quad (16)$$

где  $\tau_{рел} = \sigma_\infty^{-1} \varepsilon_o (\varepsilon_{ст} - \varepsilon_\infty)$ ;  $\varepsilon_{ст}$  – диэлектрическая проницаемость среды на стационарных частотах;  $\varepsilon_\infty$  – значения диэлектрической проницаемости среды на бесконечно высоких частотах.

Пусть электромагнитная волна падает на поверхность раздела двух сред. Введем в рассмотрение вектор Пойтинга  $S$ , который представляет собой векторную величину, содержащую три составляющие, определяющие направление распространения электромагнитной волны:

$$S = EH = (\dot{E}_y \dot{H}_z - \dot{E}_z \dot{H}_y)x + (\dot{E}_z \dot{H}_x - \dot{E}_x \dot{H}_z)y + (\dot{E}_x \dot{H}_y - \dot{E}_y \dot{H}_x)z \quad (17)$$

В этом случае мы отбрасываем отраженную электромагнитную волну  $S_1$  и берем во внимание только прошедшую волну  $S_2$ , которую можно представить как

две ортогонально связанные Т-волны  $S_2^x$  и  $S_2^y$ . Тогда первое уравнение в системе (15) будет описываться следующим образом:

$$\frac{\partial \dot{E}_2^y}{\partial y} = -\dot{Z}_2 \dot{H}_2^x \quad \frac{\partial \dot{E}_2^x}{\partial x} = \dot{Z}_2 \dot{H}_2^y \quad (18)$$

Второе уравнение в системе (15) будет описываться следующим образом:

$$\frac{\partial \dot{H}_2^y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_2^x}{\partial y} = \dot{Y}_2 \dot{E}_2 \quad (19)$$

Чтобы разделить второе уравнение на два уравнения, введем фиктивную диэлектрическую проницаемость  $\dot{\epsilon}_m$  и проводимость  $\dot{Y}_m = i\omega\epsilon_0\dot{\epsilon}_m$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{H}_2^y}{\partial x} &= \frac{1}{2} [(\dot{Y}_2 + \dot{Y}_m)\dot{E}_2^x - \dot{Y}_m \dot{E}_2^y] \\ \frac{\partial \dot{H}_2^x}{\partial y} &= \frac{1}{2} [\dot{Y}_m \dot{E}_2^x - (\dot{Y}_2 - \dot{Y}_m)\dot{E}_2^y] \end{aligned} \quad (20)$$

В уравнения (18) аналогично введем фиктивную магнитную проницаемость  $\dot{\mu}_m$  и сопротивление  $\dot{Z}_m = i\omega\mu_0\dot{\mu}_m$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{E}_2^y}{\partial x} &= \frac{1}{2} [(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_m)\dot{H}_2^x - \dot{Z}_m \dot{H}_2^y] \\ \frac{\partial \dot{E}_2^x}{\partial y} &= \frac{1}{2} [\dot{Z}_m \dot{H}_2^x - (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_m)\dot{H}_2^y] \end{aligned} \quad (21)$$

Перейдя в (20) и (21) к конечно-разностным уравнениям, матрица передачи двухмерной модели запишется следующим образом [100]:

$$[ABCD] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_m)\Delta x & -\dot{Z}_m\Delta x \\ 0 & 1 & \dot{Z}_m\Delta y & (\dot{Z}_2 - \dot{Z}_m)\Delta y \\ (\dot{Y}_2 + \dot{Y}_m)\Delta x & -\dot{Y}_m\Delta x & 1 & 0 \\ \dot{Y}_m\Delta y & (\dot{Y}_2 - \dot{Y}_m)\Delta y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Излучаемые антенным блоком (АБ) георадиолокатора (ГРЛ) электромагнитные волны (ЭМВ) формируют диаграмму направленности, приведенную на рисунке 2.13 (пунктирная линия). Из рисунка 2.13 видно, что более 90% энергии излучаемых ЭМВ сосредоточены в секторе  $150^\circ - 210^\circ$ .

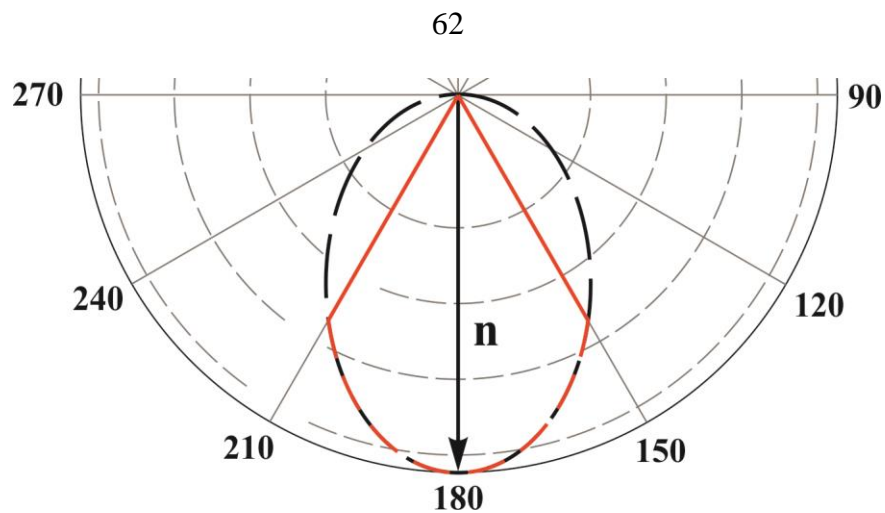


Рисунок 2.13 – Диаграммы направленности антенного блока  
(пунктирная линия) и лучевой модели (сплошная линия)

Поэтому можно ограничиться этим сектором и представить падающие ЭМВ в виде суммы параксиальных лучей, лежащих в этом секторе, так, как это показано на рисунке 2.14. Амплитуда преломленных и отраженных волн, распространяющихся в других направлениях лучами, мала, по сравнению с отраженными в прямом и обратном направлениях лучами, совпадающих с трассами, попадающими в АБ, которыми можно пренебречь. Трассы сигналов образуют параксиальные сигналы [101].

Георадиолокатор перемещается с заданным шагом  $\Delta x$ . На каждом шаге компьютер определяет координаты  $X$  и  $Y$  точек пересечения каждой трассы и слоев разных пород, вычисляет длину участков. Трассы состоят из участков с разными электрофизическими параметрами. Длина участков определяется по законам геометрической оптики. Количество трасс зависит от заданной точности и составляет 12...60, т.е. идут с шагом от 5 до 1 градуса. Используя модель распространения георадиолокационных сигналов в геологических средах, на основе метода ABCD-матриц [102], рассчитываются трассы сигналов, их временные и частотные характеристики и формируют из них синтетическую радарограмму.

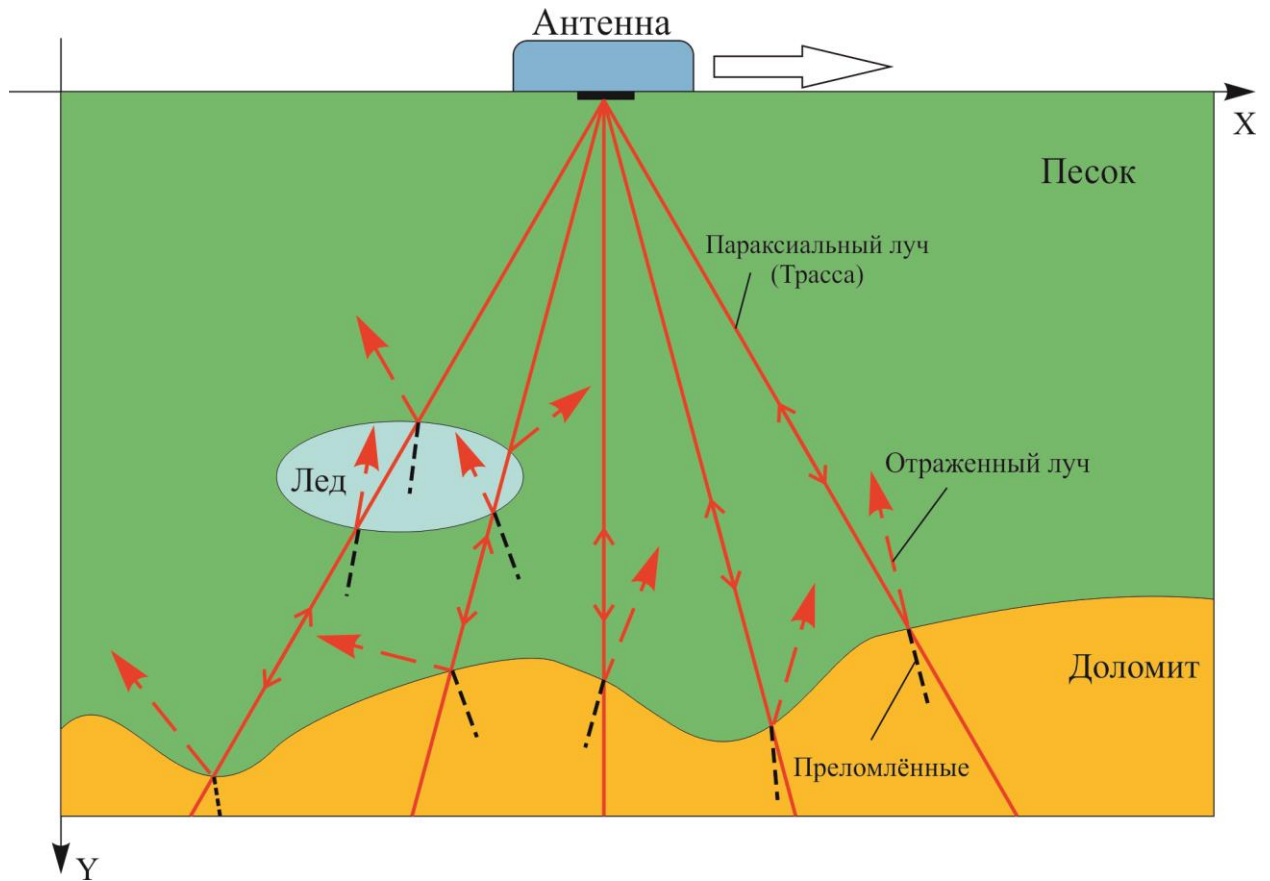


Рисунок 2.14 – Лучевая модель с трассами сигналов

В качестве примера была рассмотрена модель повторно-жильного льда (ПЖЛ) залегающего в мерзлом песке. На рисунке 2.15 б приведены амплитудно-частотные и временные характеристики трасс сигналов ГРЛ АБ-400 в точках  $x=4,44\text{м}$  (ПЖЛ) и  $x=0,97\text{м}$  (мерзлый песок).

Лучевая модель хорошо описывает распространение сигналов ГРЛ в неоднородных дисперсионных горных породах. Она, в частности, правильно описывает ПЖЛ в мерзлом песке и позволяет определить следующий алгоритм обработки данных георадиолокации: 1) выявить оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от верхних и нижних (гиперболической) границ ПЖЛ с вмещающей средой; 2) определить характер огибающей Фурье-спектра георадиолокационной трассы; 3) уточнить ширину льда по установленным зависимостям расстояние от мощности песка и значениям амплитуд георадиолокационных сигналов.

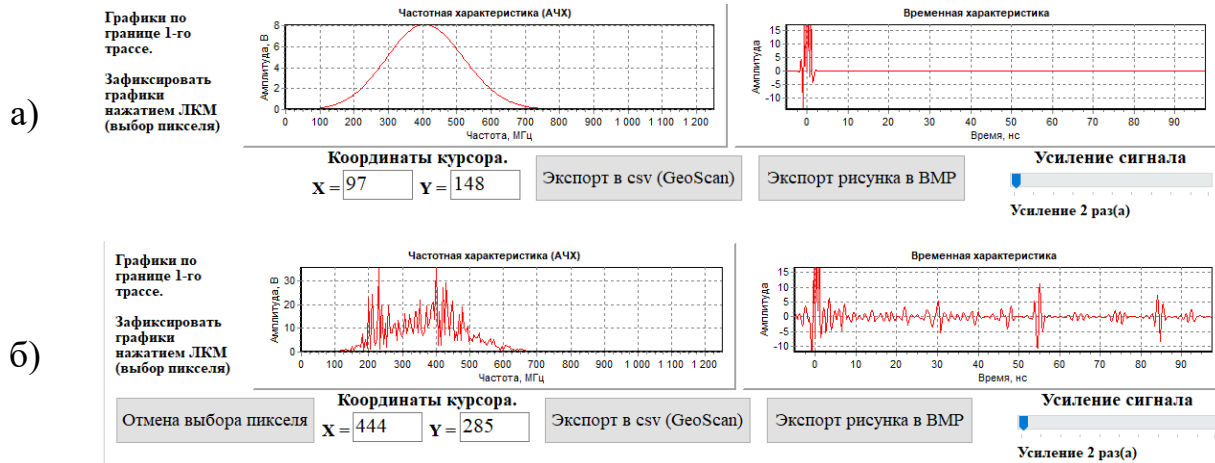


Рисунок 2.15 – Спектральные характеристики трасс георадиолокационных сигналов: а) в мерзлом песке; б) во льду

На рисунках 2.15 а, б показаны спектральные характеристики трасс георадиолокационных сигналов в мерзлом песке и во льду соответственно. Спектр частот в песке имеет гладкую, во льду изрезанную формы. В результате моделирования лучевым методом выявлен характер огибающей Фурье спектра георадиолокационной трассы во льду и в песке, которые имеют изрезанную и гладкую формы соответственно.

### 2.3 Физическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением льда

Компьютерное моделирование проводится в достаточно идеализированных условиях, однако результаты могут отличаться от итогов экспериментальных работ в натуральной среде. Следовательно, для решения этой задачи необходимо проводить физическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением льда.

Естественная среда, состоящая из горных пород, особенно когда вмещающие породы и исследуемый объект находятся в одном состоянии, мерзлом, существенно сложнее любых компьютерных моделей. Следовательно,



массив мерзлых песков с включением жильного льда является достаточно сложной моделью, и, соответственно, необходимо проводить дополнительные исследования для подтверждения полученных результатов. В таких случаях применяется физическое моделирование, поскольку в нем используются реальные материалы горных пород и геофизическая аппаратура, т.е. георадар. В большинстве физических моделирований применяются высокочастотные антенны, как наиболее подходящие размерами антенн и удобные при проведении экспериментальных работ. При составлении модели, важно знать ее размеры и параметры, чтобы выбрать антенный блок георадара с соответствующими характеристиками.

Физическое моделирование позволяет получить информацию необходимую для интерпретации различных аномалий осей синфазности георадиолокационных сигналов полученных на участках массива горных пород с включением ПЖЛ [103-105]. А также по результатам моделирования, возможно, установить критерии обнаружения и оконтуривания ПЖЛ в массиве мерзлых горных породах.

Работы по моделированию распространения георадиолокационных сигналов проводились в рамках конкурса научно-исследовательских работ (НИР) для аспирантов и молодых специалистов Института горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского в 2016-2017 гг. Экспериментальные работы проводились на открытом воздухе во второй половине марта, когда температура воздуха позволяла проводить георадиолокационные работы в комфортных условиях. В данном случае моделью горного массива служат контейнеры, наполненные мерзлым речным песком, моделью ПЖЛ являются куски речного льда.

Использованная в экспериментальных исследованиях физическая модель горного массива с включением льда, представляет собой 2 одинаковых деревянных контейнера размерами 80x80x52 см между которыми помещались куски речного льда размерами 32 и 20 см (рисунок 2.16), при этом ширина льда (L) менялась от 25 см до 5 см с шагом 10 см.



Рисунок 2.16 – Физическая модель горного массива с включением льда

В эксперименте применялся георадар «ОКО-2» (Группа компаний «Логис-Геотех», Россия) с высокочастотным антенным блоком АБ-1200 МГц. Размеры контейнеров выбраны, исходя из параметров диаграммы направленности георадара АБ-1200 МГц, схема которой показана на рисунке 2.17 а [108,109]. Радиус первой зоны Френеля для АБ-1200 МГц на глубине 52см (высота контейнеров) составляет 26 см, а при отсыпке физической модели на 20 см равен 31 см.

Для устранения возможных помех после установки модели были убраны все деревянные стенки контейнеров, оператор с ноутбуком и блоком управления (БУ) находился на удалении от модели во время эксперимента. В первом эксперименте ширина льда составляла 25 см, георадар находился в контакте со средой, съемка начиналась от середины первого блока и заканчивалась на середине второго блока, при этом лёд был отмечен меткой с двух сторон на георадиолокационной радарограмме. Далее, измерения были проведены при отсыпке модели слоем

песка с шагом 5 см до высоты 20 см, также меняли ширину льда на 25, 15 и 5 см.

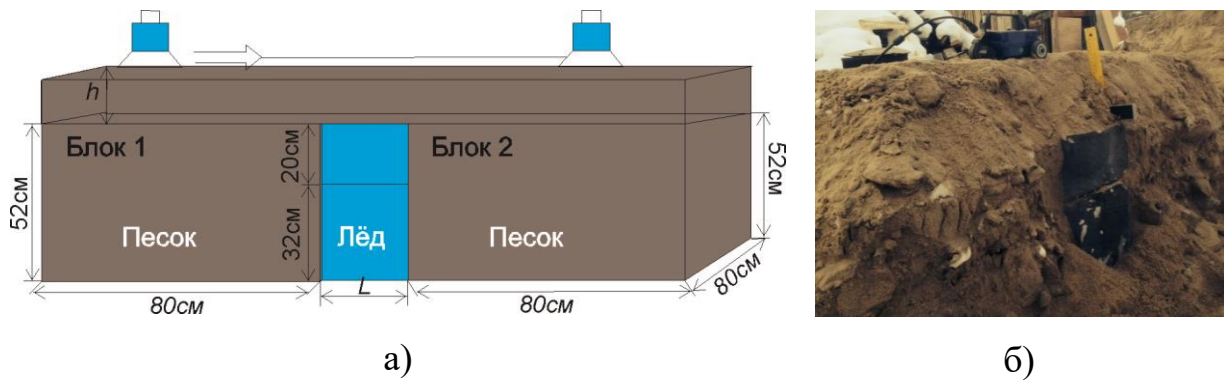


Рисунок 2.17 – Схема модели рыхлых отложений, с включением льда (а);  
фотография модели массива горных пород с включением льда  
во время проведения эксперимента (б).

На рисунке 2.17б представлена модель горного массива с включением льда, погребенной рыхлыми отложениями, мощность которых составляет 20 см. Всего во время эксперимента было проведено более 50 георадиолокационных измерений.

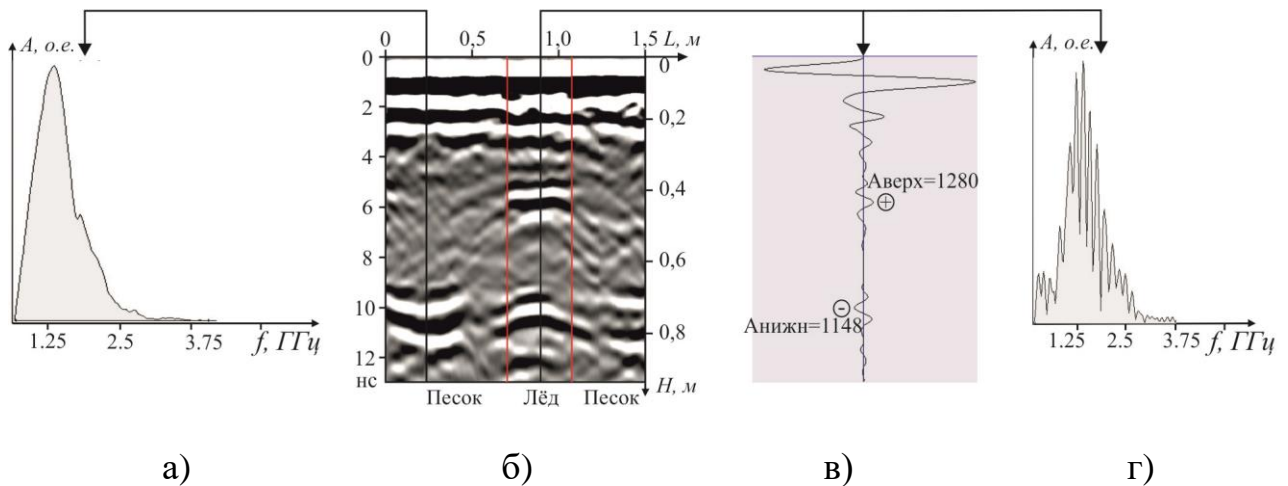


Рисунок 2.18 – Радарограмма (б) и спектральные характеристики  
георадиолокационных трасс: а) в песке; г) во льду;  
в) георадиолокационная трасса во льду.

В результате экспериментальных георадиолокационных измерений были получены радарограммы, на которых видна граница между кусками льда (рисунок

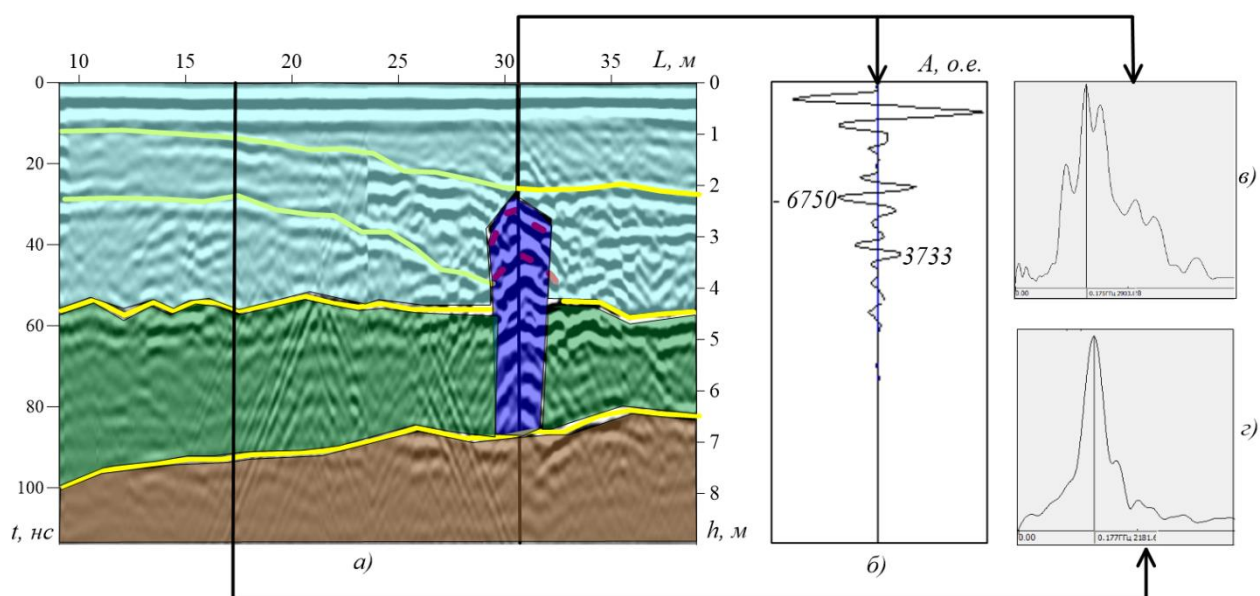
2.18 б) и нижняя граница льда, имеющая гиперболическую форму, а также нижние границы блоков, т.е. песков.

На рисунках 2.18 а, г представлены спектральные характеристики георадиолокационных сигналов, полученных на границе песок-лёд, а также от нижней границы льда, с центральными частотами 1082 МГц и 780 МГц соответственно. При этом спектральные характеристики георадиолокационных трасс, полученных при зондировании песка, имеют относительно гладкую форму, а трассы, полученные в месте расположения льда, имеют довольно изрезанный спектр. Эта особенность объясняется суммированием спектров георадиолокационных сигналов дифрагированных на поверхности льда, т.к. диаграмма направленности георадара шире льда, то различные частотные составляющие зондирующего сигнала по-разному распространяются в модели горного массива. Более низкие частоты или огибают лёд, или отражаются от него сложным образом. Эта особенность спектральных характеристик может служить критерием выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

В результате компьютерного и физического моделирования установлены критерии, выявления ПЖЛ по данным георадиолокации [106]:

- наличие двух гиперболических осей синфазности, расположенных одна под другой;
- повышенная изрезанность формы Фурье-спектра георадиолокационных трасс;
- противоположность фаз сигналов верхней и нижней осей синфазности, однако, невозможно однозначно утверждать, что они являются однозначными интерпретационными признаками определения ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород. Так как такие признаки могут проявиться от валунов, локальных неоднородностей и т.д. Итак, для однозначного определения проявления ПЖЛ на данных георадиолокации проведен анализ амплитудно-временных характеристик георадиолокационных сигналов, полученных в исследованиях, проведенных в натуральных условиях.

Георадиолокационные данные получены в результате экспериментальных работ проведенных на объектах разрабатываемых АО «Алмазы Анабара», приисках «Маят» и «Молодо». Георадиолокационные измерения проводились в 2019, 2021 гг. в рамках договора о сотрудничестве ИГДС СО РАН с АО «Алмазы Анабара». Работы выполнены в апреле месяце, когда массив горных пород находился, в мерзлом состоянии и температура воздуха в дневное время составляло, около  $-20^{\circ}\text{C}$ , которое является комфортным условием для проведения георадиолокационных работ. Применялся георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250 МГц в режиме непрерывной съемки. Полученные георадиолокационные разрезы подтверждались данными буровых скважин.



Условные обозначения:

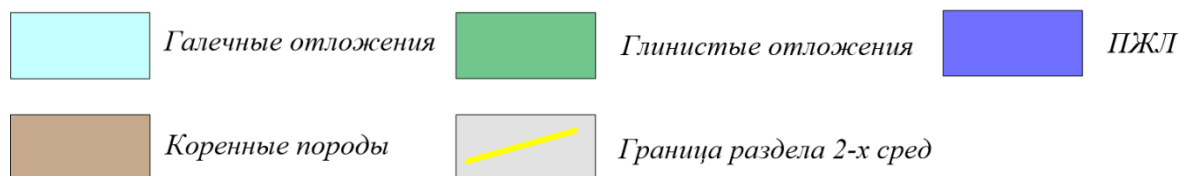


Рисунок 2.19 – Пример интерпретации георадиолокационного разреза:

- а) радарограмма; б) георадиолокационная трасса; в) спектр частот во льду; г) спектр частот вне льда.

На рисунке 2.19 показан пример интерпретационного георадиолокационного разреза, на котором желтыми линиями обозначены границы раздела сред. Разрез представляет с собой 3-х слойную среду состоящего из галечного, глинистого отложений и коренных пород. Также в разрезе проявляется локальный объект в виде ПЖЛ имеющую вертикальную форму, где красной пунктирной линией обозначены верхняя, нижняя границы льда. Все три критерии выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, которые указанные выше также представлены на рисунке 2.19 а, б и в. Далее, на основании этих полученных георадиолокационных данных проведена интерпретация остальных радарограмм, которые подтвердились данными буровых скважин (рисунок 3.4).

После выявления ПЖЛ на георадиолокационных разрезах рассчитаны затухания электромагнитных волн ( $r$ ) по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ по формуле [107]:

$$r = 20 * \lg(A_{\text{верх}}/A_{\text{нижн}}) \text{ (дБ)} \quad (23)$$

и построены их графики в зависимости от времени  $\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}}$  (нс) прохождения в ПЖЛ, которые могут быть линейно аппроксимированы функциями  $r_m$ ,  $r_{\text{вм}}$  (рисунок 2.20). Общий вид графиков схож, т.к. угловой коэффициент обеих линий составляет около 0,74. При этом синие точки характеризуют более чистый ПЖЛ, чем лёд на участке «р. В.Маят». На основе полученных полевых данных, возможно обобщение значений  $r$ , с помощью уравнения:

$$r(\Delta t) = 0,74 * (\Delta t + k) \quad (24)$$

где  $k$  – коэффициент чистоты льда, который равняется 3,2 для участка месторождения «р. Молодо», -8 для участка «р. В. Маят».

Для подтверждения уравнения  $r(\Delta t)$  проведено физическое моделирование распространения электромагнитных волн в массиве мёрзлых горных пород, содержащем ПЖЛ, с последующим расчетом  $r$ . На рисунке 2.20б представлен график с полученными значениями  $r$ , линейная аппроксимация которых соответствует угловому коэффициенту 0,78. Данный график подтверждает достоверность уравнения  $r(\Delta t)$  результатов полевых данных.

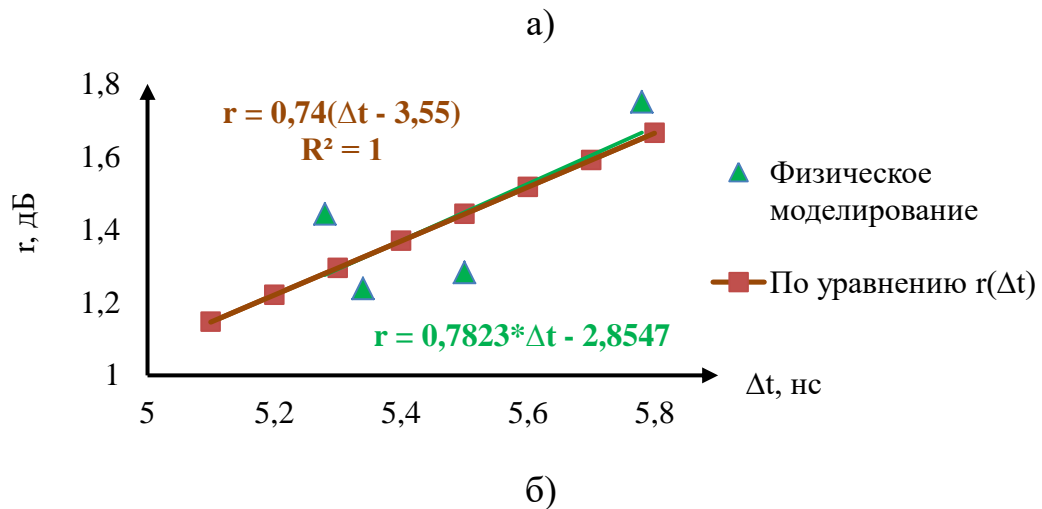
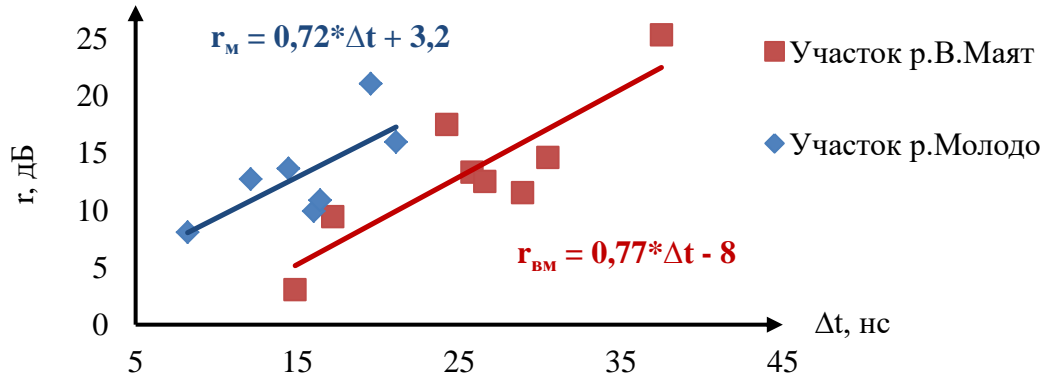


Рисунок 2.20 – Графики зависимостей затухания амплитуды георадиолокационных сигналов от времени прохождения по результатам: а) полевых измерений; б) физического моделирования.

Таким образом, по итогам результатов компьютерного и физического моделирования, подтверждается возможность выявлять ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород, методом георадиолокации.

## ВЫВОДЫ

При применении стандартного программно-методического обеспечения, метод георадиолокации зачастую не обеспечивает качественное исследование массива мёрзлых горных пород с ледяными включениями. Трудно однозначно интерпретировать полученные данные, так как границы имеют сложную

геометрию, и их трудно точно определить при стандартной обработке. Чтобы улучшить результаты георадиолокации при анализе ПЖЛ, которые не затронуты термокарстом, в мёрзлых горных породах, требуется разработать новую методику измерения, обработки и интерпретации георадиолокационных данных. При этом методика интерпретации должна основываться на установленных зависимостях затухания электромагнитных волн в ПЖЛ.



### 3 Методика георадиолокационного исследования повторно-жильных льдов незатронутых термокарстом в мерзлых рыхлых отложениях криолитозоны

В предыдущей главе была рассмотрена проблема определения ПЖЛ в массиве горных пород методом георадиолокации. Теоретические расчеты дальности обнаружения льда разной ширины в массиве горных пород, а также физическое моделирование распространения электромагнитных волн в ПЖЛ в массиве горных пород, представленные в главе 2, подтверждают применимость георадиолокационного метода для решения практических задач. Однако для эффективного использования указанного метода в горном деле следует разработать методику исследования массива горных пород с ПЖЛ незатронутых термокарстом, а также обработки и интерпретации георадиолокационных данных полученных при полевых исследованиях россыпных месторождений алмазов криолитозоны.

#### 3.1 Обоснование выбора аппаратуры и параметров проведения полевых георадиолокационных измерений

В настоящее время при изучении строения массива мерзлых горных пород, включая пески (продуктивный пласт) и торфа (вскрышные породы), в рамках геологоразведочных работ, инженерно-геологических изысканий и эксплуатационной разведки применяются "традиционные" методы - горнопроходческие шурфы и бурение скважин. Эти методы позволяют получить общую картину геологического строения рыхлых отложений месторождений россыпных алмазов криолитозоны. Однако для более детального изучения требуется увеличение плотности разведочной сети, что приводит к значительному увеличению трудозатрат и стоимости проведения работ "традиционными" методами. По этой причине, в данное время в комплексе геологоразведочных работ на стадии эксплуатационной разведки месторождений россыпных алмазов

значительный объем исследований проводится геофизическими методами. Современное оборудование для этих методов представлено цифровой аппаратурой, предназначенной для изучения массива мерзлых горных пород. Оно отличается высокой производительностью, оперативностью и относительно низкой стоимостью работ. Анализ ранее проведенных геофизических работ показал, что для повышения эффективности применения георадиолокации при изучении ПЖЛ, незатронутых термокарстом, в массиве мёрзлых горных пород необходимо разработать и апробировать методику измерения, обработки и интерпретации георадиолокационных данных [74,76,108].

На основе предварительных расчетов и априорной информации правильно подобранная методика измерений направлена на увеличение эффективности, глубины и разрешающей способности георадиолокационных работ. Критерии выбора аппаратуры и уровня детализации исследований определяются техническим заданием, которое включает в себя цели и задачи исследований, а также электрофизические характеристики зондируемых массивов горных пород, размеры площади, пересеченность местности и рельеф участка исследований. Сезонность планируемых работ выбирается только весенняя, т.к. температура воздуха становится оптимальной для проведения георадиолокационных работ, и содержание воды (в жидкой фазе) практически исключается в зондируемой среде. Выбор параметров георадиолокационных измерений определяется в зависимости от режима съемки, т.е. от скорости передвижения георадара, длины регистрируемого профиля, быстродействия аппаратуры (рисунок 3.1).

Привязка профилей играет ключевую роль в определении точности георадиолокационных измерений, ибо от неё зависит ряд факторов, и осуществляется при проведении георадиолокационной съемки путём выставления промежуточных маркеров, привязанных к пикетам профиля при помощи GPS приемника. В основном, такими пикетами являются скважины, горнопроходческие шурфы и выходы обнажений на дневную поверхность. Достоверность данных георадиолокационных измерений оценивается сопоставлением результатов интерпретации с геологическим описанием разрезов

горнопроходческих шурфов и буровых скважин. По результатам анализа и сопоставления данных бурения скважин или проходки шурфов и георадиолокации уточняются электрофизические свойства массива горных пород, в том числе повторно-жильного льда для детальной интерпретации результатов исследований.



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Различные режимы съемки проведения георадиолокационных измерений на россыпных месторождениях алмазов: а) на снегоходе; пешком в режиме: б) дискретно; в) непрерывно.

В рамках инженерно-геологических изысканий основные технические требования и правила производства геофизических исследований определены в СП 11-105-97 (Часть VI) "Правила производства геофизических исследований" от 2004 года. [109]. Этот документ является основным руководством, устанавливающим стандарты для проведения таких работ. Методика проведения геофизических исследований для доразведки и эксплуатационной разведки месторождения россыпных алмазов криолитозоны планируется на стадии проектирования, исходя из априорной информации о конкретном участке исследований.

В априорную информацию входят данные о рельефе местности, степени залесённости, инженерно-геологическое строение массива горных пород, включающего состав и мощность рыхлых отложений, наличие криогенных объектов, в том числе ПЖЛ. Важную роль играет топографо-геодезическая изученность района исследования. Результатом таких работ является топографическая схема с сечением рельефа, планово-высотная привязка буровзрывных полигонов, илоотстойников, зумпфов, руслоотводных каналов (горнопроходческие работы (ГПР), горнотехнические сооружения (ГТС)), поисково-оценочных шурфовых и буровых линий и т.д. Также необходимо иметь информацию о геолого-геоморфологическом очерке района, который включает в себя такие разделы, как стратиграфия, тектоника и геоморфология. Так как россыпные месторождения алмазов криолитозоны Лено-Анабарского междуречья Севера Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), в основном приурочены к аллювиальным отложениям, которые развиты в руслово-низкопойменных частях и высокой пойме речных долин, то, необходимо иметь информацию о стратиграфии современных отложений, которые, в основном, представляются гравийно-галечным материалом с примесью глины, песка и валунов, т.к. их мощность в основном изменяется в широких пределах от 0,4-0,5 до 4-7 м.

В тектоническом отношении россыпные месторождения алмазов Анабарского и Приленского алмазоносных провинций, приурочены к узлам пересечения глубинных разломов, под влиянием, которых могут оказаться на

уровне современного эрозионного среза (до 5-30 м) сложнопостроенные тела, такие как сочетание даечных, жильных и пластовых тел (силлов) различной мощности и ориентировки с формированием, в конечном счёте, специфических по форме «штокверкообразных» тел.

В геоморфологическом отношении бассейны рек россыпных месторождений алмазов в основном представляют собой выработанную в доломитах денудационно-аккумулятивную поверхность выравнивания, в которую врезаны унаследованные с верхнечетвертичного времени долины современных водотоков, представляющих несколько типов рельефа: структурно-денудационный, денудационно-аккумулятивный, денудационно-эрозионный и эрозионно-аккумулятивный. На основе приведенных данных, обязательной составляющей частью методики является нанесение, разбивка и привязка георадиолокационных профилей на плане участка работ. Направление профилей выбирается вкрест простирания объекта исследования. Для привязки данных исследований, возможно, использовать GPS или ГЛОНАСС систему позиционирования.

Выбор эффективной частоты оборудования для проведения исследований основывается на требованиях, установленных в техническом задании, с учетом разрешающей способности, зависящей от размеров обследуемого объекта и состава горных пород. Параметры объекта, такие как глубина залегания, мощность и ширина ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, играют ключевую роль в этом выборе. Например, для достижения разрешающей способности в 0,5 метра необходимо выбрать зондирующий сигнал с преобладающей длиной волны не превышающей 1 метр в грунте, чтобы обеспечить условие: разрешающая способность по глубине не менее половины длины волны. В случае поиска объекта дифракции, например, ПЖЛ, длина волны должна быть примерно в 2-4 раза больше его характерного размера [93].

Исходя из данных расчетов, производится выбор центральной частоты, а также соответствующей антенной системы для конкретного георадара. Это необходимо для того, чтобы обеспечить запись полезного сигнала,

соответствующего дифрагированной или отраженной волне, по крайней мере, в пределах динамического диапазона записи, указанного в паспорте прибора [104].

В настоящее время в георадиолокации широко используется спектр частот антенных блоков от 50 до 2500 МГц. Разрешающая способность этого метода составляет от 1 до 0,02 м, а энергетические возможности типовых георадаров ограничены диапазоном 90-120 дБ. Это обеспечивает возможность исследования мерзлых горных пород с высокой детализацией на глубину до 30 метров (при использовании частоты 50 МГц). Рекомендуемая аппаратура для различных глубин исследования, основанная на технических характеристиках георадара "ОКО-3" [110] и результатов экспериментальных измерений на месторождениях алмазов криолитозоны, представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Рекомендуемая аппаратура для исследований массива мерзлых горных пород на различных глубинах

Требуемая глубина, м	Антенный блок, МГц	Режим съемки
До 5 м	АБ-400	Непрерывный Дискретный По перемещению
5-8 м	АБ-400, 250	
8-12 м	АБ-250, 150	
12-30 м	АБ-90, АБДЛ-100, 50	

Применение георадиолокации в условиях открытой разработки россыпных месторождений алмазов криолитозоны затруднено в летнее время, в связи с появлением сезонно-талого слоя, в результате чего область исследования обычно превращается в болото, при этом резко повышается электропроводимость перекрывающих пород. На талых породах глубинность метода уменьшается в среднем в 1,5 раза, и появляются сигналы – помехи в виде кратных переотражений георадиолокационных сигналов. Георадиолокационные работы предпочтительно проводить при полном промерзании массива горных пород, так как в этом случае он характеризуется минимальным поглощением

электромагнитных волн, что способствует созданию оптимальных условий для георадиолокации.

Удобно проводить георадиолокационную съемку на пересеченной местности и в сложных условиях эксплуатации, используя методически адаптированные гибкие линейные антенны (АБДЛ-Тритон). Достоинство данного антенного блока – возможность проводить георадиолокационные измерения в режиме дискретных и непрерывных наблюдений. Недостаток заключается в том, что антенный блок производит неэкранированное излучение в верхнюю полусферу, что приводит к возникновению отражений (сигналов помех) от локальных объектов на поверхности. Это усложняет работу на сильно залесенных местностях, на буровзрывных полигонах, где наблюдается скопление машин, горной техники и т. п. Также из-за низкой частоты антенного блока георадара нет возможности его применять при исследованиях на неглубокозалегающих (до 5-6 м) месторождениях россыпных алмазов, т.к. он имеет достаточно большую «слепую» зону.

В георадиолокации для увеличения глубинности исследований выбирают антенны с более низкими центральными частотами зондирующего сигнала, что приводит к снижению разрешающей способности. Для исследования глубокозалегающих россыпных месторождений алмазов с сохранением возможности изучить верхние слои геологических сред, предлагается проводить зондирования в трех спектрах частот. Для достижения глубин до 12-30 м в условиях высокоомных сред применяются антенные блоки с низкой центральной частотой возбуждаемых колебаний (от 50 до 90 МГц), тогда как для увеличения детализации исследований на глубинах 5-12 м используют антенные блоки с более высокой частотой (от 150 до 400 МГц). Для проведения высокоразрешающих исследований в приповерхностной зоне, на глубинах 1-5 м, применяются частоты от 500 МГц и выше.

Следующим этапом после определения эффективной центральной частоты прибора является установка параметров съемки. Для георадиолокационной съемки с использованием аппаратуры серии "ОКО-3" применяется стандартное

программное обеспечение GeoScan32. Перед началом измерений установка параметров аппаратуры включает в себя: определение шага между точками зондирования, установку значения количества накоплений отсчетов, определение числа точек отсчета по глубине на каждое зондирование, развертку (время, наносекунды) по глубине, установку коэффициента усиления и определение диэлектрической проницаемости среды.

Один из ключевых параметров измерений в георадиолокации - это накопление сигналов ( $N$ ), то есть количество сигналов на профиле, которые затем суммируются. Этот параметр зависит от скорости записи сигналов и требуемой детализации исследования массива мерзлых горных пород. Увеличение количества накопленных сигналов приводит к замедлению скорости съемки, однако это позволяет выявлять сигналы на фоне аппаратных и техногенных «шумов». В таблице 3.2 приведены рекомендованные значения параметров съемки для аппаратуры «ОКО-3», уточненные экспериментальными натурными исследованиями на участках россыпных месторождениях алмазов криолитозоны. Предел допускаемой относительной погрешности по значениям глубины приборов в пределах 5%.

Полевые георадиолокационные работы проводятся в 2 вариантах: профилирование или зондирование. Вариант профилирования применяется для исследования более однородных геологических разрезов, состоящих из горизонтально-слоистых сред, для прослеживания отдельных геологических границ раздела, например, кровли плотика. Вариант зондирования применяется для изучения разреза сравнительно сложной структуры, с вертикальными локальными объектами, в том числе с включением ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород до заданной глубины исследования.

При обнаружении локальных неоднородностей, таких как повторно-жильные льды, с использованием метода георадиолокации, основными параметрами являются расстояние между точками зондирования и между профилями, а также развертка по времени. Выбор этих параметров зависит от априорной информации о глубине залегания и размерах объекта исследования.



Таблица 3.2 – Основные параметры сканирования и рекомендуемые значения измерений

Антенные блоки	Развертка, нс	Кол-во точек по глубине	Накопление (N) контакт	Диэлектрическая проницаемость	Аттенуатор	Усиление	Скорость сканирования (км/ч)	Режим сканирования		Глубинность, м	Разрешение, м
								Дискретно	непрерывно		
Тритон 30/50/100	400-800	512	64	В соответствии с табличными значениями	0/20	Влияет только на отображение сигналов 10-100	2-10	Дискретно	непрерывно	25-30	2
АБ-150	200-400		32-64		0/20			Дискретно	непрерывно	12	0,35
АБ-250	100-200		32-64		0			непрерывно		8	0,25
АБ-400	100-200		48-64		0			непрерывно		5	0,2

При большом размере площади съемку предлагается проводить, прицепляя георадар к снегоходу, в режиме непрерывных наблюдений. Для этого необходимо корректно выставлять цифровое накопление сигналов для получения качественных георадиолокационных данных на определенных глубинах измерений. Поэтому при непрерывном режиме зондирования обязательно устанавливается максимальное количество трасс, для получения достаточного объема данных измерений в одном файле.

### 3.2 Обработка и интерпретация данных георадиолокации массива горных пород с включением льда

Основная задача обработки георадиолокационных данных заключается в выделении полезного сигнала, который представляет собой оси синфазности

полезных волн, на фоне различных помех и шумов. После этого информация о полезных волнах, их оси синфазности, амплитуды, частотный состав, общий вид записи и другие характеристики используются для получения параметров среды. Для выделения полезных сигналов применяются методы, основанные на различиях в их характеристиках по сравнению с соответствующими характеристиками шума и помех [93].

В геологических и инженерно-геологических задачах, решаемых методом георадиолокации, обычно выделяют две основные категории объектов исследования. Это позволяет разделить обработку георадиолокационных данных на две группы:

1) Картирование геологических структур, таких как восстановление геометрии протяженных границ, поверхности коренных пород под рыхлыми отложениями, определение уровня грунтовых вод, а также обнаружение границ между средами с различной диэлектрической проницаемостью и т.д.;

2) Поиск локальных объектов, таких как карстовые и суффозионные провалы, а также участки разрушенной структуры горных пород, повторно-жильных льдов, валунов, обследование инженерных сооружений, нарушений массива горных пород разной степени и т.д.

Из опыта ранее проведенных исследований массива мерзлых горных пород, известно, что в ряде случаев, в частности для выявления и оконтуривания ПЖЛ в рыхлых отложениях, для интерпретации лучше использовать необработанные исходные («оригинальные») георадиолокационные данные. При этом радарограмму можно существенно улучшить обработкой.

Для точной и однозначной интерпретации радарограммы для выявления ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород разработан алгоритм обработки георадиолокационных данных. Алгоритм состоит из трех этапов:

1) Подготовка первичных полевых данных (объединение фрагментов протяженных профилей, выделение волн-помех, определение уровня относительного нуля шкалы глубин, топографическая привязка меток радарограммы);

Цель данной операции состоит в подготовке полевых георадиолокационных данных к последующей обработке. Прежде всего, полевые данные проходят процесс просмотра на экране компьютера в максимально сжатом виде - по трассе на каждую точку экрана по горизонтали. Это позволяет оценить общий объем данных и получить общее представление о полевом материале. Затем производится следующие этапы:

- записи калибровочных сигналов, выявление пропусков и бракованных участков записи, а также анализ записей георадиолокации с последующим удалением данных, не подлежащих дальнейшей обработке;

- определяется также количество трасс на экране для будущей печати результатов обработки.

2) Редакция данных, включающая удаление отдельных трасс-помех, неинформативных фрагментов радарограммы, а также прореживание или интерполяцию в соответствии с новым шагом по профилю. Данная процедура также включает объединение нескольких файлов полевых записей в единый файл при необходимости.

3) Процедуры обработки данных, такие как изменение коэффициента усиления записи, подавление помех (цифровая фильтрация), вычитание среднего значения, а также выставления рельефа местности, производятся по необходимости. Изменение коэффициента усиления записи производится для коррекции амплитуд по единому множителю вдоль трассы и по профилю для всех трасс с целью сделать радарограмму более "яркой" или увидеть слабые отражения на волновой картине.

На рисунке 3.2 приведен пример улучшения отображения георадиолокационного разреза с помощью регулировки усиления осей синфазности георадиолокационных трасс на основе опорной точки представленной данными буровой скважины. Однако, следует отметить, что при исследованиях массива горных пород с включением ПЖЛ без априорной информации в опорных точках и для исключения геофизических аномалий полученных от других объектов, похожих по форме на ПЖЛ (от валунов,

неоднородностей вертикальной формы и т.д.), необходимо, проверять наличие интерпретационных признаков, разработанных при проведении компьютерного и физического моделирования, которые представлены в Главе 2, для последующего расчленения разреза, либо для поиска или выявления и оконтуривания ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

По сути, целью разработанного алгоритма обработки георадиолокационных данных, является, выделение полезных отражений, подавление воздушных волн-помех, обнаружение дифрагированных волн-гипербол, идентификации изменений частоты, фазы и амплитуды сигнала на радарограммах (волновых картинах), из которых и формируется критерии выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

По результатам компьютерного и физического моделирования обоснованы критерии выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород методом георадиолокации:

- Наличие двух гиперболических осей синфазности, расположенных одна под другой (наличие двух непрерывных осей синфазности расположенных одна под другой с гиперболическими «хвостами»);
- Повышенная изрезанная форма Фурье-спектра георадиолокационных трасс;
- Противоположность фаз сигналов верхней и нижней осей синфазности;
- Линейная зависимость затухания ( $r$ ) амплитуды георадиолокационных сигналов от времени прохождения ( $\Delta t$ ).

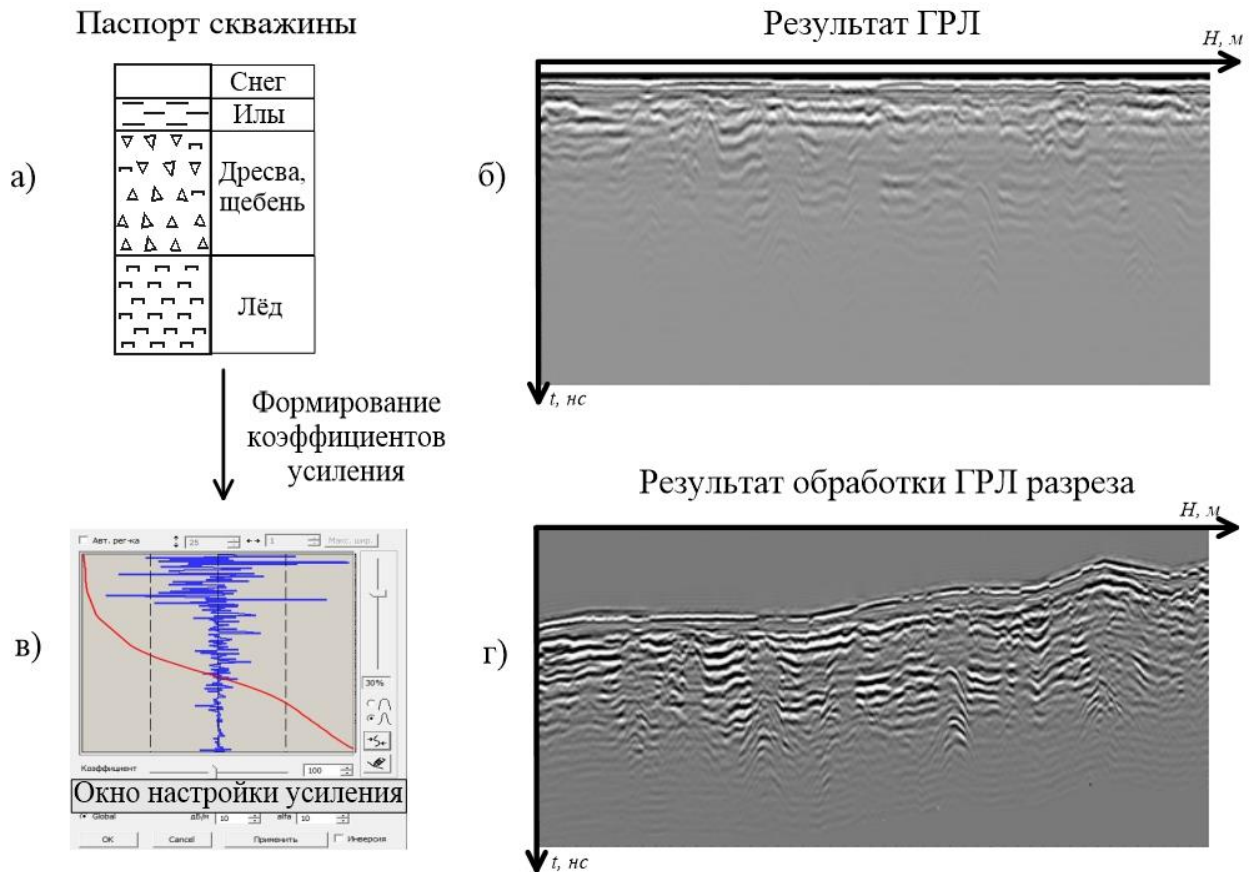


Рисунок 3.2 – Пример регулировки коэффициента усиления по данным скважины:

- а) паспорт скважины; б) результат ГРЛ; в) окно настройки усиления; г) результат первичной обработки ГРЛ разреза

Обычно более надежные результаты интерпретации разреза достигаются при сопоставлении данных георадиолокации с результатами бурения. Подробно остановимся на интерпретации и детальном анализе фрагмента радарограммы, полученной на участке россыпного месторождения алмазов криолитозоны. На рисунке 3.3 в качестве примера представлен георадиолокационный разрез массива горных пород с включением ПЖЛ, на котором выделены, синим цветом 2 гиперболических отражения, находящиеся друг над другом, представлены паспорта 2-х скважин и показана трасса георадиолокационного сигнала с амплитудными значениями, также с указанными полярностями фаз. Геологический разрез представлен рыхлыми отложениями, сложенными илистыми отложениями, песками, дресвой, щебнистыми грунтами, суглинками и

ПЖЛ. В период бурения скважин (апрель, 2019 г.) массив горных пород находился в твердомерзлом состоянии. Для интерпретации применена методика выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

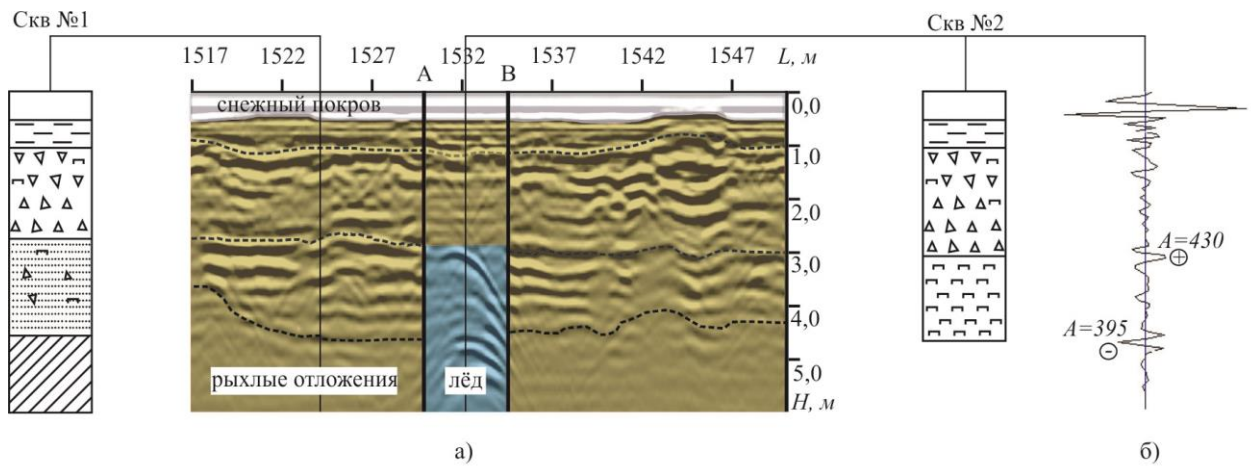
*Наличие двух гиперболических осей синфазности*, которые расположены одна под другой, возникающих при отражении от ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород при приближении и отдалении георадара. В зависимости от коэффициента отражения в массиве мерзлых горных пород ось синфазности может быть контрастной или слабой, либо отсутствовать в зависимости от «чистоты» ПЖЛ.

Причем форма гиперболы меняется в зависимости от глубины: верхняя граница ПЖЛ имеет более «длинные усы» дифракции, чем нижняя, однако гипербола от нижней границы становится шире, чем от верхней, т.е. ширина раскрытия ее увеличивается с глубиной, что связано с размером первой зоны Френеля для электромагнитных волн (рисунок 3.3 а).

*Повышенная изрезанность формы Фурье-спектра георадиолокационных трасс*, полученная в месте расположения льда. Эта особенность объясняется суммированием спектров георадиолокационных сигналов, дифрагированных на поверхности льда, т.к. различные частотные составляющие зондирующего сигнала по-разному распространяются в массиве горных пород. Более низкие частоты или огибают лед, или отражаются от него сложным образом.

*Противоположность фаз сигналов верхней и нижней осей синфазности* георадиолокационных сигналов, это происходит из-за отрицательного коэффициента отражения на границе вмещающая среда - ПЖЛ (рисунок 3.3 б).

*Линейная зависимость затухания ( $r$ ) амплитуды георадиолокационных сигналов от времени прохождения ( $\Delta t$ )*. Рассчитаны затухания электромагнитных волн ( $r$ ) по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ по формуле  $r = 20 \cdot \lg(A_{\text{верх}}/A_{\text{нижн}})$  (дБ). На основе полученных полевых данных, возможно обобщение значений  $r$ , с помощью уравнения  $r(\Delta t) = 0,74 \cdot (\Delta t + k)$ , где  $k$  – коэффициент чистоты льда.



Условные обозначения:







	Илы		Песок		Лёд
	Древесна, щебень		Суглинок		Снег

Рисунок 3.3 – Георадиолокационный разрез массива горных пород с включением ПЖЛ: а) радарограмма; б) трасса георадиолокационного сигнала

Однако, если один из критериев будет отсутствовать, то объект от которого отразились дифрагированные волны не является ПЖЛ, залегающим в массиве мерзлых горных пород. Следовательно, для выявления ПЖЛ все 3 критерия должны присутствовать одновременно.

На основе анализа георадиолокационного разреза (рисунок 3.3) на рисунке 3.4 представлена интерпретация георадиолокационного разреза с помощью выработанных критериев выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород. На радарограмме (рисунок 3.4 а) выделены красными пунктирными линиями границы раздела сред и обозначены желтыми вертикальными линиями контуры дифрагированных волн-гипербол, которые необходимо проверить по 3 критериям выявления ПЖЛ. После проверки всех гипербол, построен интерпретационный разрез с выделенными ПЖЛ «столбообразной» формы в массиве горных пород, которые на рисунке 3.4 б обозначены серыми линиями.

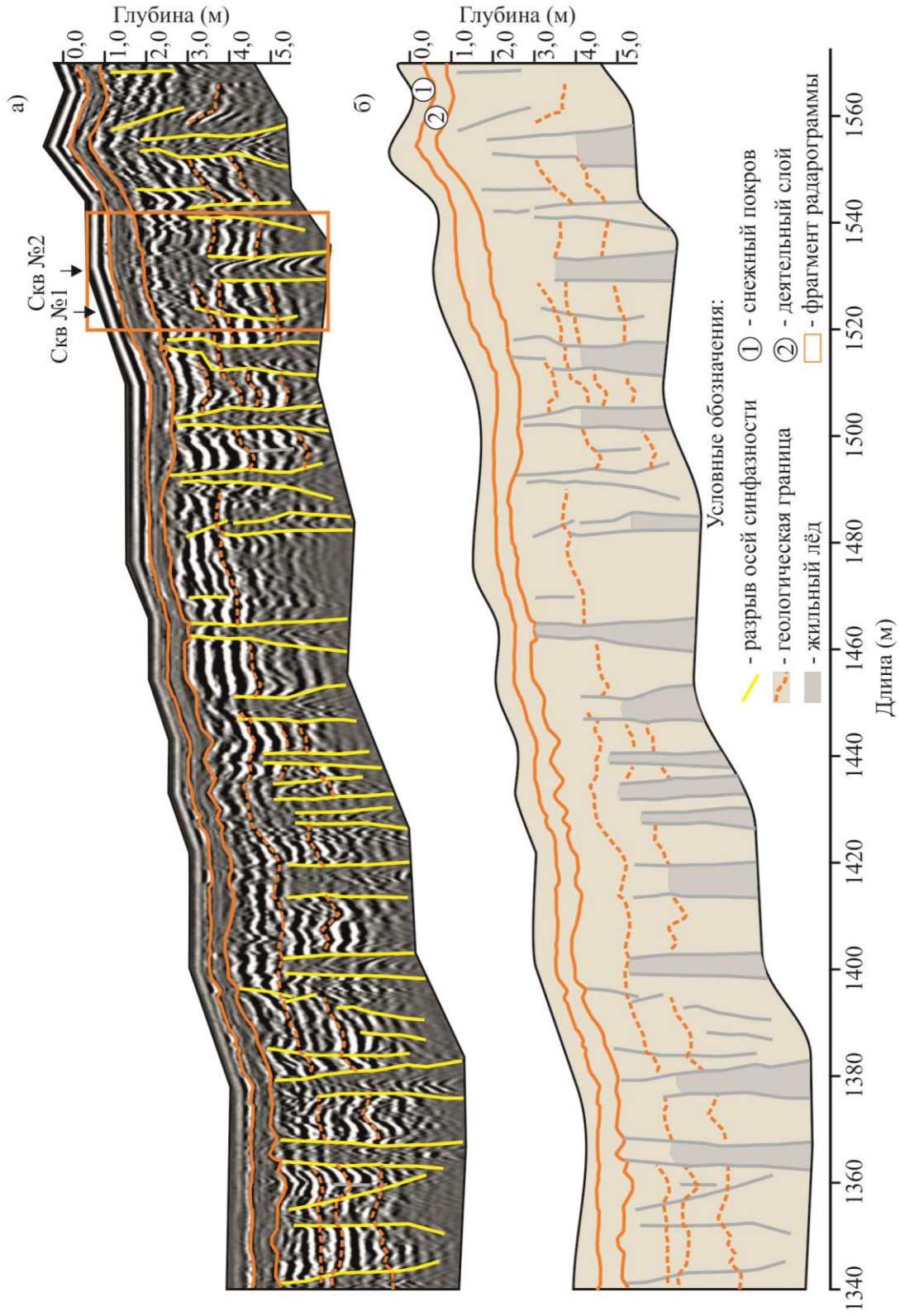


Рисунок 3.4 – Интерпретация георадиолокационного разреза: а) радарограмма;  
б) интерпретационный разрез



### 3.3 Апробация методики георадиолокационных исследований ПЖЛ на участке прииска «Молодо»

Апробация разработанной методики по картированию ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, незатронутых термокарстом, методом георадиолокации, проведено на участке АО «Алмазы Анабара», находящегося в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья на границе с Приленской низменностью [107]. Для определения границы залегания и оконтуривания ПЖЛ, незатронутых термокарстом, в массиве мёрзлых горных пород исследуемого участка работы выполнены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком «АБ-250М» (НПО «Логис-Геотех», Россия) (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Фотография георадара с антенным блоком «АБ-250М» на участке исследования

Георадиолокационные исследования проводились в марте 2021 г., при полном промерзании массива горных пород. Работа проводилась в виде площадной съемки, т.к. было необходимо провести картирование ПЖЛ на исследуемом участке. Следовательно, георадиолокационные профили проложены

параллельно друг к другу, по направлению русла реки, расстояние между ними составляло от 2 до 3 м. Режим георадиолокационной съемки выбран «по перемещению». Для привязки георадиолокационных данных на местности использовался датчик перемещения с колесом (ДП-32), а также GPS приемник. Обработка георадиолокационных данных выполнена в программном обеспечении GeoScan32 (НПО «Логис-Геотех», Россия). Все полученные результаты георадиолокационных измерений заверялись данными буровых скважин и обнажений борта массива горных пород.

Результаты полевых георадиолокационных исследований массива горных пород с включениями ПЖЛ приведены на рисунке 3.6. Заверка волновых образов подземного льда на радарограммах выполнена по рекогносцировочному профилю, непосредственно примыкающему к исследуемому участку, вдоль буровой линии и обнажения массива горных пород. Протяженность профиля составляла 230 м, поверхность была расчищена от деревьев и снега (рисунок 3.6а). Скважины пробурены с шагом 4 - 5 м и отмечены на интерпретационном георадиолокационном разрезе черными вертикальными линиями (рисунок 3.6б).

В рыхлых отложениях отмечены ПЖЛ и пластовые льды, оконтуренные черной линией. Синим прямоугольником, отмечен, участок, на котором имеется обнажение ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород. На рисунке 3.6в показана фотография обнажения, где красной пунктирной линией оконтурен ПЖЛ, а также представлен фрагмент георадиолокационного разреза с волновым образом льда. Красными пунктирными линиями обозначены верхняя и нижняя границы льда, отображенные на радарограмме дифрагированными волнами в виде гипербол. Далее представлена трасса георадиолокационного сигнала по центру льда, где его фаза от нижней границы меняется относительно верхней. И, как видно, спектр частот, взятый в области волнового образа льда, имеет изрезанную форму. По этим трём критериям, возможна интерпретация данной волновой картины, как отражения от границ ПЖЛ. Критерии выявления ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород определялись по результатам проведения их численного и физического моделирования, которые описаны в главе 2.

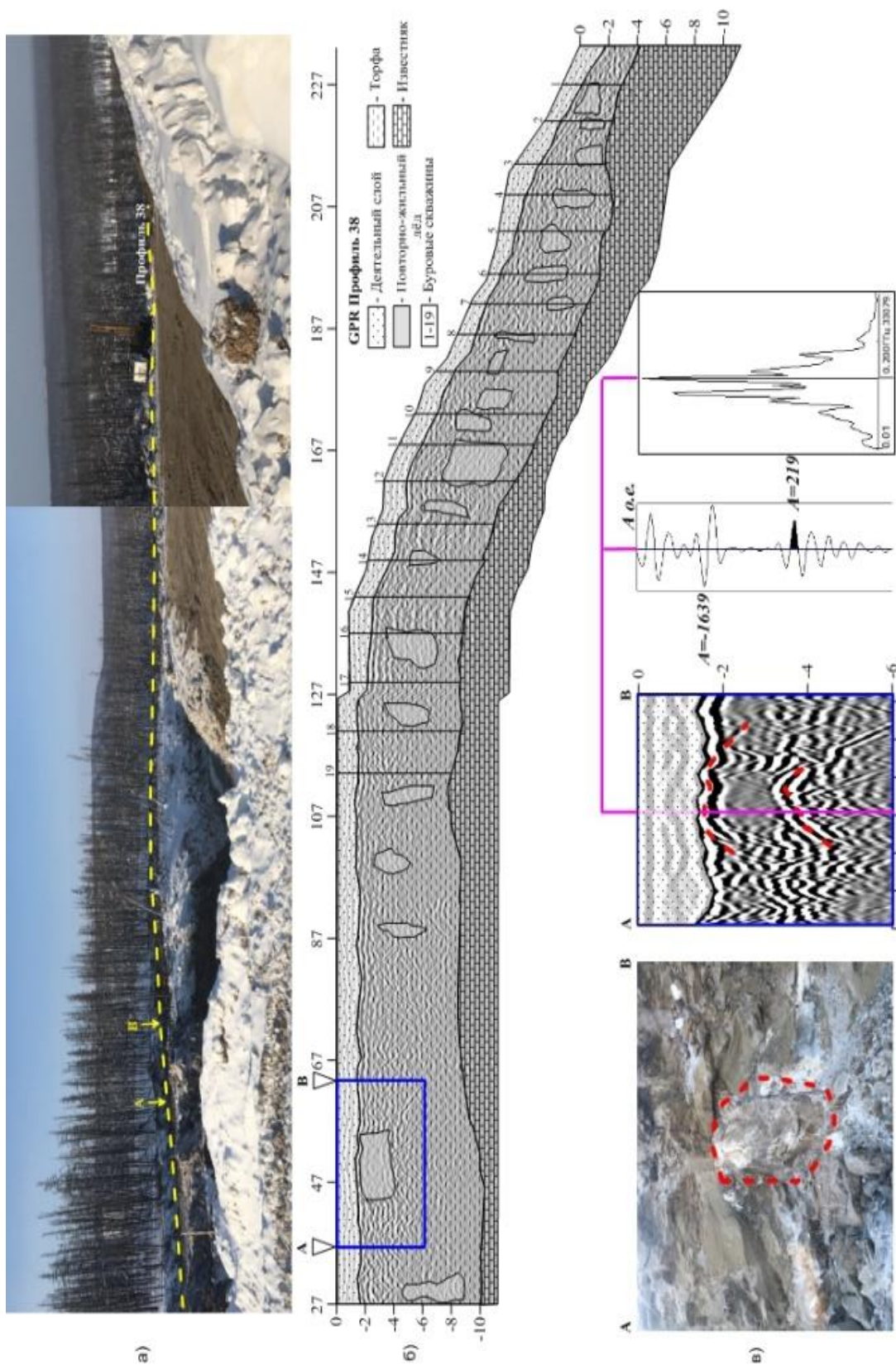


Рисунок 3.6 – Полевые материалы георадиолокационного исследования ПЖЛ

Для подтверждения выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, проведен расчет затухания ( $r$ ) электромагнитных волн по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ с помощью уравнения:  $r(\Delta t) = 0,74(\Delta t + k)$ , где  $k$  – коэффициент чистоты льда, который имеет положительное значение и равняется 3,2.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных георадиолокационных исследований разработана методика картирования ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород россыпных месторождений криолитозоны. Методика включает в себя сбор априорных данных, выбор аппаратуры и параметров измерения, обработку георадиолокационных данных по разработанному алгоритму, интерпретацию георадиолокационного разреза на основе выработанных критериев, картирование включений ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

Разработан алгоритм обработки георадиолокационных данных на основе анализа спектральных характеристик георадиолокационного сигнала полученного во льду обоснованы критерии выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

4 Результаты георадиолокационных исследований строения массива мерзлых горных пород с включением ПЖЛ на россыпных месторождениях алмазов криолитозоны

4.1 Обнаружение и оконтуривание ПЖЛ при оценке горно-геологических условий месторождений криолитозоны (на примере участков «Новогодний» и «р. Куоллээх»)

Для проведения вскрышных работ буровзрывным способом при добыче полезных ископаемых россыпных месторождений криолитозоны на севере ЯАП необходима оперативная информация о строении массива горных пород. Вскрышные работы ведутся в зимнее время года, когда массив горных пород находится полностью в мёрзлом состоянии. Анализ ранее проведенных геокриологических исследований показывает, что на россыпных месторождениях криолитозоны на севере ЯАП в массиве горных пород включение ПЖЛ незатронутых термокарстом составляет до 60 % [7]. Как правило, они залегают по всей глубине рыхлых отложений, т.к. в основном россыпные месторождения относятся к аллювиальному типу.

Для проведения буровзрывных работ в таких горно-геологических условиях, возникают технические сложности проведения взрывов, т.к. взрывная волна идет по направлению наименьшего сопротивления, в результате в большинстве случаев получается большой выход негабарита и увеличенный средний размер куска взорванной горной массы, приводящие в дальнейшем к сложности экскавации. При бурении скважин информация о геологическом строении массива горных пород участка достоверна лишь около пробуренных скважин. Для наиболее эффективного проведения буровзрывных работ на россыпных месторождениях криолитозоны необходимо четко знать строение массива горных пород в полигонах и поисково-разведочных шурфовых и буровых линиях.

Экспериментальные исследования возможности применения метода георадиолокации для изучения строения массива мерзлых горных пород были проведены нами, в том числе и с целью выявления ПЖЛ незатронутых термокарстом [83].

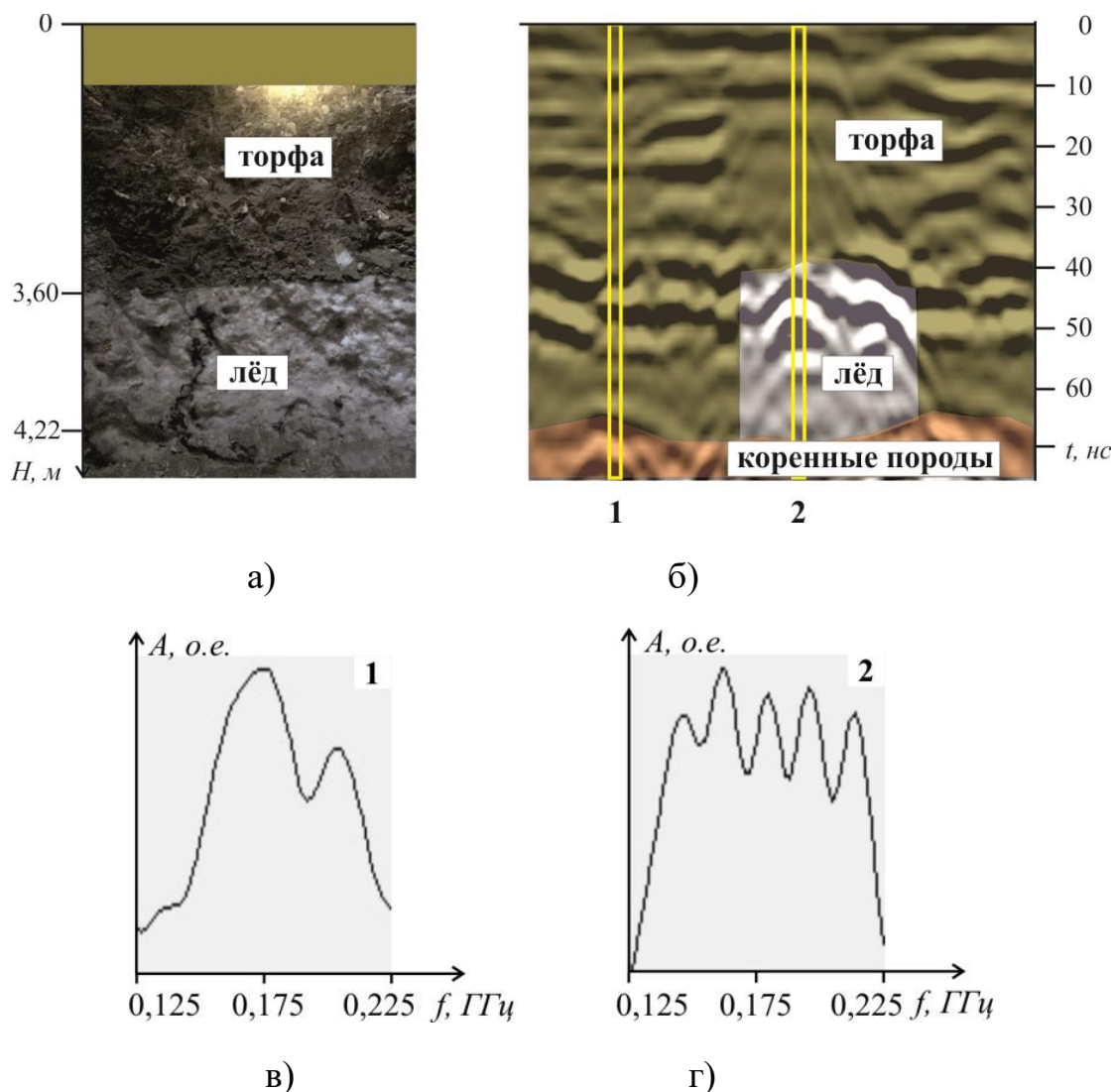


Рисунок 4.1 – а) фотография борта шурфа; б) фрагмент радарограммы вдоль шурфа; спектральные характеристики георадиолокационных трасс: в) в песке; г) во льду.

Георадиолокационная съемка была проведена на участке «Новогодний» (Анабарский район Республики Саха (Якутия)) россыпного месторождения алмазов криолитозоны, вдоль линии шурфов, в весеннее время, когда горные

породы находились максимально в мерзлом состоянии. Съемка проведена георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 250 МГц обеспечивающей глубину исследования до 8 м, с детальностью 0,25 – 0,3 м (в зависимости от физических свойств горных пород) по профилю протяженностью 130 м.

В результате обработки и интерпретации георадиолокационных данных, была получена радарограмма (рисунок 4.1б), на которой выделены ПЖЛ и границы геологических сред в соответствии с данными шурфа (рисунок 4.1а). Граница подошвы рыхлых отложений расположена на глубине около 4 м, ниже которой залегают коренные породы, представленные доломитами.

Далее на радарограмме выделяется ПЖЛ, отмеченный серым цветом, с выделенными парами дифрагированных волн осей синфазности, расположенных одна над другой. Также на радарограмме отмечены желтыми прямоугольниками области взятия спектральных характеристик георадиолокационных трасс там, где прослеживаются песок и лёд. На рисунке 4.1в, г представлены соответствующие спектры, по которым видно, что наличие льда в массиве горных пород характеризуется изрезанной формой спектра.

Экспериментальный участок исследования был выбран на надпойменной террасе р. Куоллээх, недалеко от русла одноименного ручья (рисунок 4.2а).

Разрез сложен мёрзлой супесью с включением ПЖЛ мощностью до 2 м (рисунок 4.2б). На рисунке 4.3б представлена радарограмма, полученная по результатам выполненных георадиолокационных измерений, с выделенными парами непрерывных осей синфазности, расположенных одна над другой, в соответствии с первым признаком: 4-15 м, 20-30 м, 38-46 м, 52-58 м, 70-82 м, 90-105 м.



а)

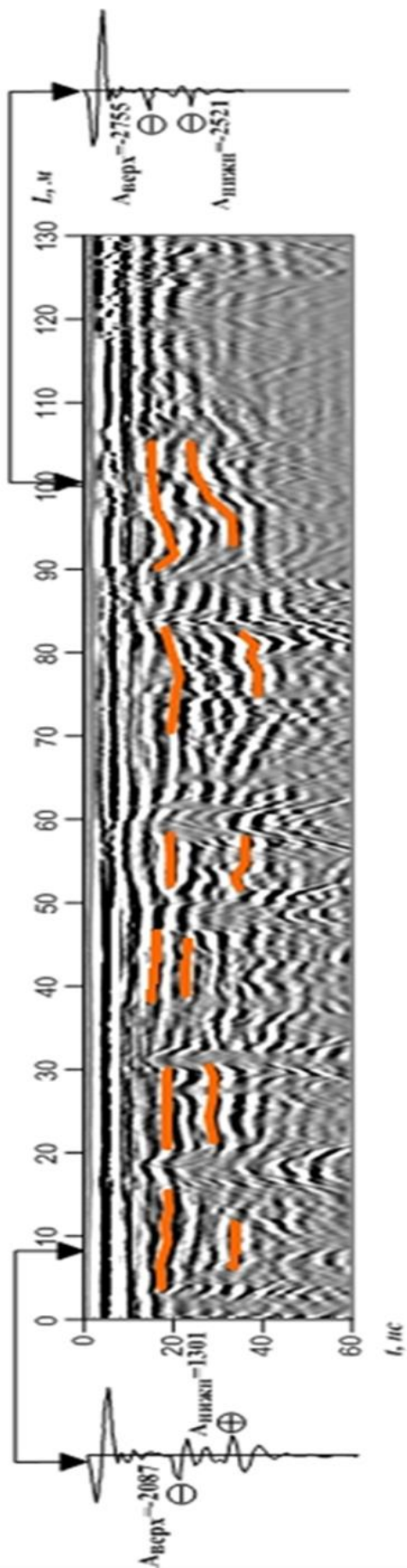
б)

Рисунок 4.2 – Фотографии с экспериментального участка исследования:  
 а) георадиолокационная съемка вдоль шурфовой линии; б) борт шурфа,  
 пересекающего пластовой лёд

По второму признаку участки, выявленные в интервалах профиля 20-30 м и 90-105 м – отбраковываются, т.к. фаза георадиолокационного сигнала на нижней оси синфазности не меняется по сравнению с верхней (рисунок 4.3в). Остальные участки сходны по радиофизическим параметрам георадиолокационных сигналов, например, амплитудные значения сигналов на втором участке составляют 2087 отн.ед. от верхней границы с отрицательной фазой и 1301 отн.ед. от нижней границы с положительной фазой (рисунок 4.3а).

Таким образом, в результате проведенного исследования апробированы критерии выявления ПЖЛ в мерзлом массиве горных пород по данным георадиолокации, что позволяет применять метод георадиолокации при оценке горно-геологических условий месторождений криолитозоны.





а)

б)

в)

Рисунок 4.3 – Георадиолокационный разрез с выделенными парами непрерывных осей синфазности, расположенных одна над другой.

а) георадиолокационная трасса с указанными амплитудными значениями сигналов верхней и нижней осей синфазности первого участка; б) радарограмма; в) георадиолокационная трасса шестого участка

#### 4.2 Результаты георадиолокационных исследований ПЖЛ на буровзрывных блоках прииска «Маят»

Георадиолокационные исследования проводились на буровзрывных полигонах прииска «Маят», весной 2016 г. с целью детализации структуры строения массива горных пород, методом профильного зондирования георадаром «ОКО-2М». Для исследования применены антенные блоки «АБ-250» и «АБДЛ – Тритон» с центральными частотами 250 и 50 МГц соответственно [81,84].

Исследования включали в себя георадиолокационное профилирование выбранных участков буровзрывных блоков, топографическую привязку, обработку информации и интерпретацию полученных данных.

Георадиолокационные измерения на участках «Пески», «РОК» и «Торфа» проводились в апреле 2016 г. в контакте со средой в соответствии с разработанной методикой. Обследованию подвергнуты 3 участка, с общей протяженностью георадиолокационных профилей 3489 пог. м. Съемка по профилям произведена антенным блоком АБ-250 в непрерывном режиме.

Участок «Пески» обследован 3-мя профилями параллельными друг к другу. Длина каждого профиля - 66 м, расстояние между ними – 3 м. Измерения начаты с R0244\_0000 профиля, далее последовательно производили съемку «змейкой» до 3 профиля. При обработке второй файл был реверсирован, в результате направление профилей указаны в одну сторону и начало их соответствует южной стороне местности.

Участок «РОК» обследован 4-мя профилями параллельными друг к другу. Измерения начаты с R0234\_0009 профиля, далее последовательно производили съемку «змейкой» до 4 профиля. Длина каждого профиля – 292 м, расстояние между ними – 3 м. Направление профилей выбиралась по ранее пробуренным скважинам, с юго-запада на северо-восток. Также, и ноль соответствует юго-западной стороне местности.

Участок «Торфа» обследован по 6-ти профилям параллельным друг к другу. Использован антенный блок АБДЛ-Тритон. Режим проведения работ

непрерывный. Измерения начаты с P0224\_0009 профиля, далее последовательно производили съемку «змейкой» до 6 профиля. Длина каждого профиля – 134 м, расстояние между ними - 3 м. Направление профилей выбиралась по ранее пробуренным скважинам, с юга на север. При обработке соответствующие файлы были реверсированы, и ноль соответствует южной стороне местности.

Георадиолокационные профили привязаны с помощью навигационного устройства Garmin GPSmap62. Для проведения полевых измерений и сбора данных использован портативный ноутбук в связке с антенными блоками АБ-250 и АБДЛ-Тритон, блок управления и блок питания. Для автоматизации записи используется программное обеспечение (ПО) «GeoScan32» (ООО «ЛогиС»).

На рисунке 4.4 показана схема расположения георадиолокационных профилей на исследуемом участке. На рисунке 4.5 показана георадиолокационная съемка на буровзрывных блоках антенным блоком АБ-250 (а) и просмотр получаемых данных для возможной корректировки параметров съемки (б). При запуске ПО «GeoScan32» в режиме сканирования отображаются основные параметры съемки, осциллограмма текущей трассы и перед началом записи радарограммы производится коррекция вертикального смещения сигнала, а также оценка его амплитуды, формы и затухания на глубине. Результаты представлены в виде черно-белых или цветных полос, отображающих линии синфазности, а также шумы и помехи, возникающие в процессе записи. Информация сохраняется в файле, при этом процесс записи контролируется на экране ноутбука.

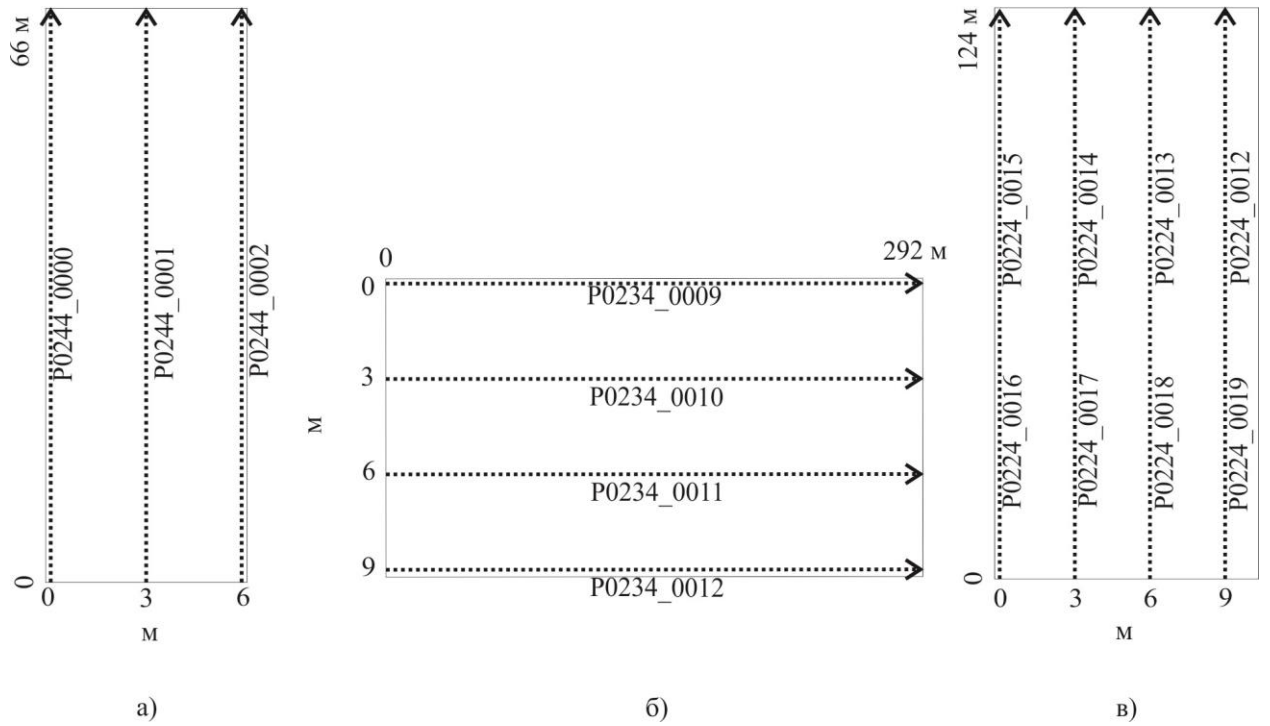


Рисунок 4.4 – Схема расположения георадиолокационных профилей на участке работы: а) участок «Пески», б) участок «РОК», в) участок «Торфа»



а)



б)

Рисунок 4.5 – Георадиолокационная съемка георадаром «ОКО-2» на буровзрывных участках: а) «АБ – 250»; б) корректировка параметров съемки

### Участок «РОК»

На данном участке по результатам площадной съемки методом георадиолокации с антенным блоком АБ-250 получено 4 файла (цифровых данных) в виде радарограмм, пройденные по указанным линиям желтого цвета (рисунок 4.6). Максимальная глубина зондирования георадиолокации составила 6-8 м. Длина каждого профиля – 292 м, расстояние между ними – 3 м.

Разрезы непрерывного георадиолокационного профилирования по площади работ характеризуются сходным строением. Результаты обработки интерпретируются в соответствии с данными скважин 12-52, 12-170, 10-250, 9-10, 9-30 и 9-175. Результаты работ приведены на рисунках 4.7-4.10. На примере обработки и интерпретации разреза по условному профилю P0234\_0012 (рисунок 4.10) выделена подошва рыхлых отложений. Ниже находятся коренные породы представленные доломитами. Также в разрезе выделяются локальные неоднородности, интерпретируемые как линзы льда (на рисунках отмечены контурами синего цвета). Присутствие ледяных линз на радарограмме проявляется высокоамплитудными сигналами, иногда с повторными отражениями. Отмеченные границы красной пунктирной линией на глубинах 4-8 м возможно представляют участки подошвы нарушенных коренных пород, о чем свидетельствуют «хаотичные» сигналы отражения.

По результатам георадиолокационных работ построена псевдо 3D карта распространения локальных неоднородностей, связанных с отражением от линз льда (рисунок 4.11). Установлено, что распространение льдов с примесями горных пород на участке исследований обширно. Лед выявлен как в толще торфов, так и в толще песков.



Рисунок 4.6 – Фотография участка исследования «РОК» на буровзрывном полигоне

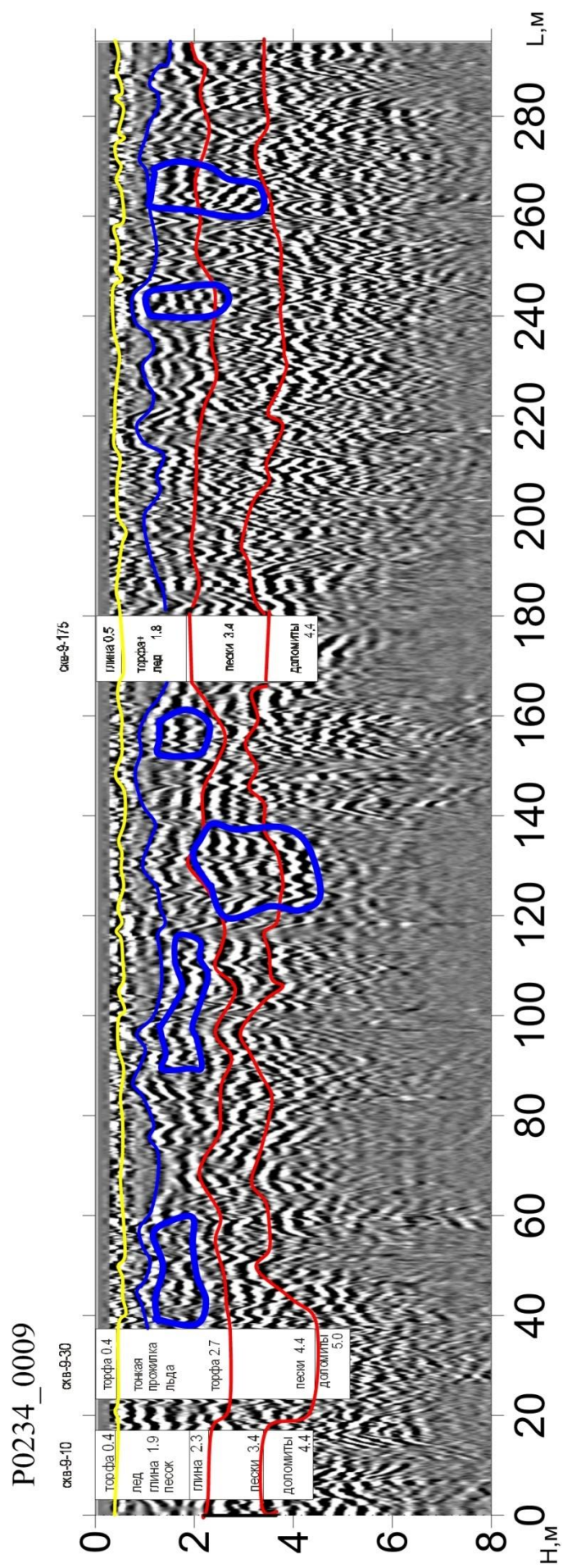


Рисунок 4.7 – Интерпретационный разрез рыхлых отложений по данным георадиолокации (файл P0234\_0009)

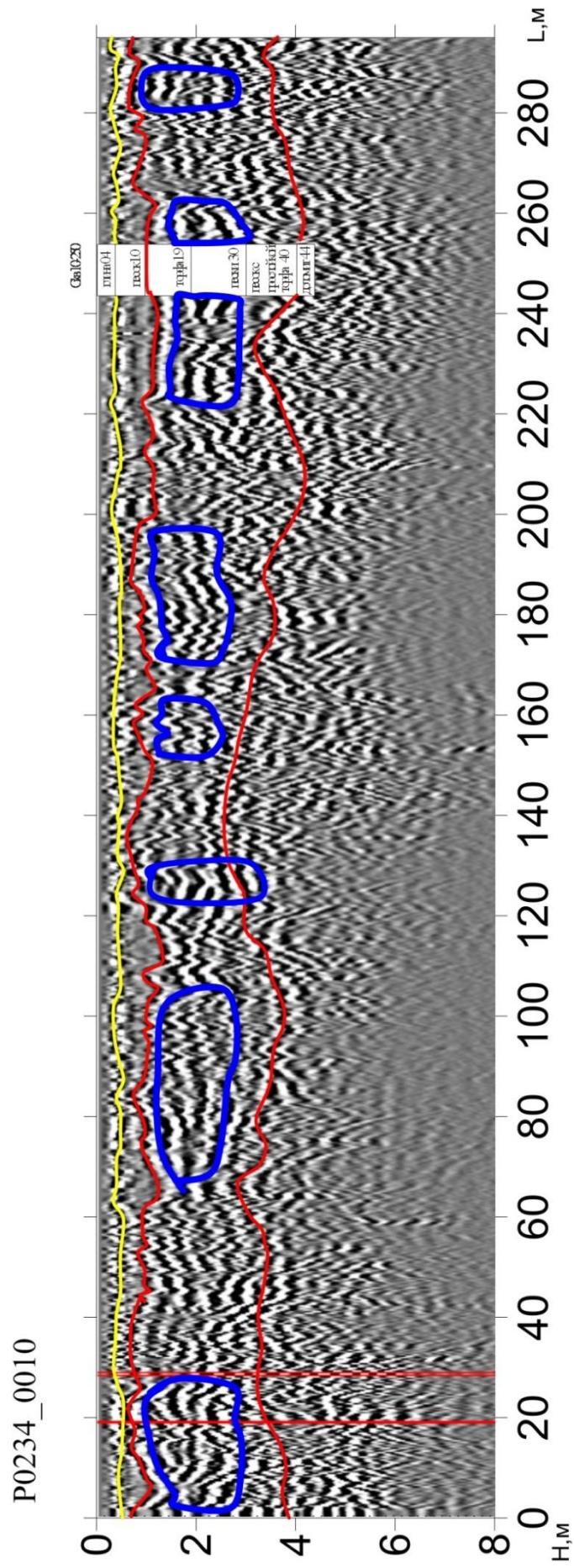


Рисунок 4.8 – Интерпретационный разрез рыхлых отложений по данным георадиолокации  
(файл P0234\_0010)



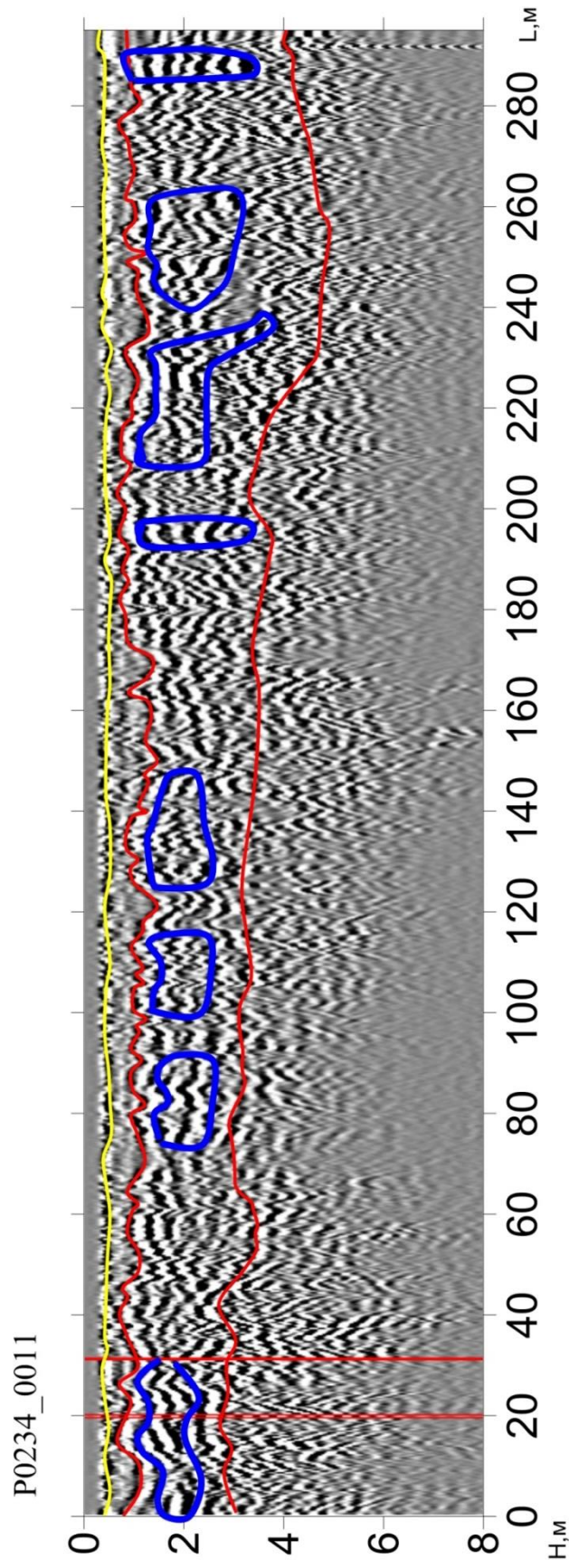


Рисунок 4.9 – Интерпретационный разрез рыхлых отложений по данным георадиолокации  
(файл P0234\_0011)

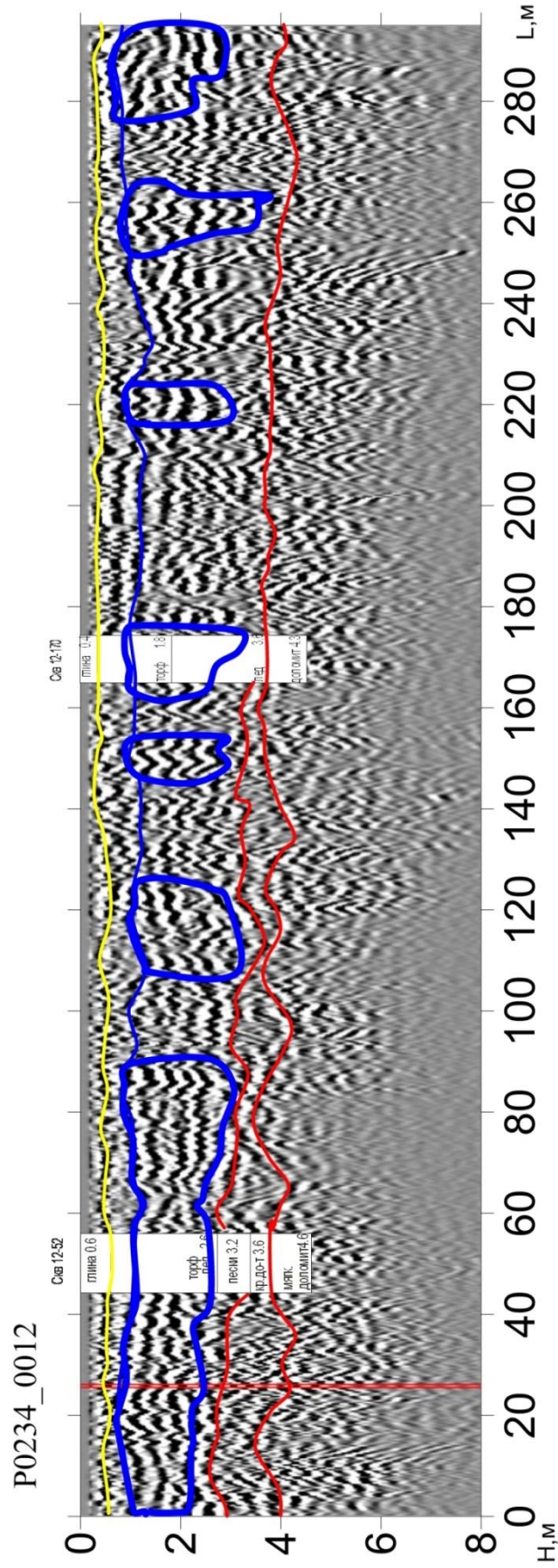


Рисунок 4.10 – Интерпретационный разрез рыхлых отложений по данным георадиолокации (файл P0234\_0012)

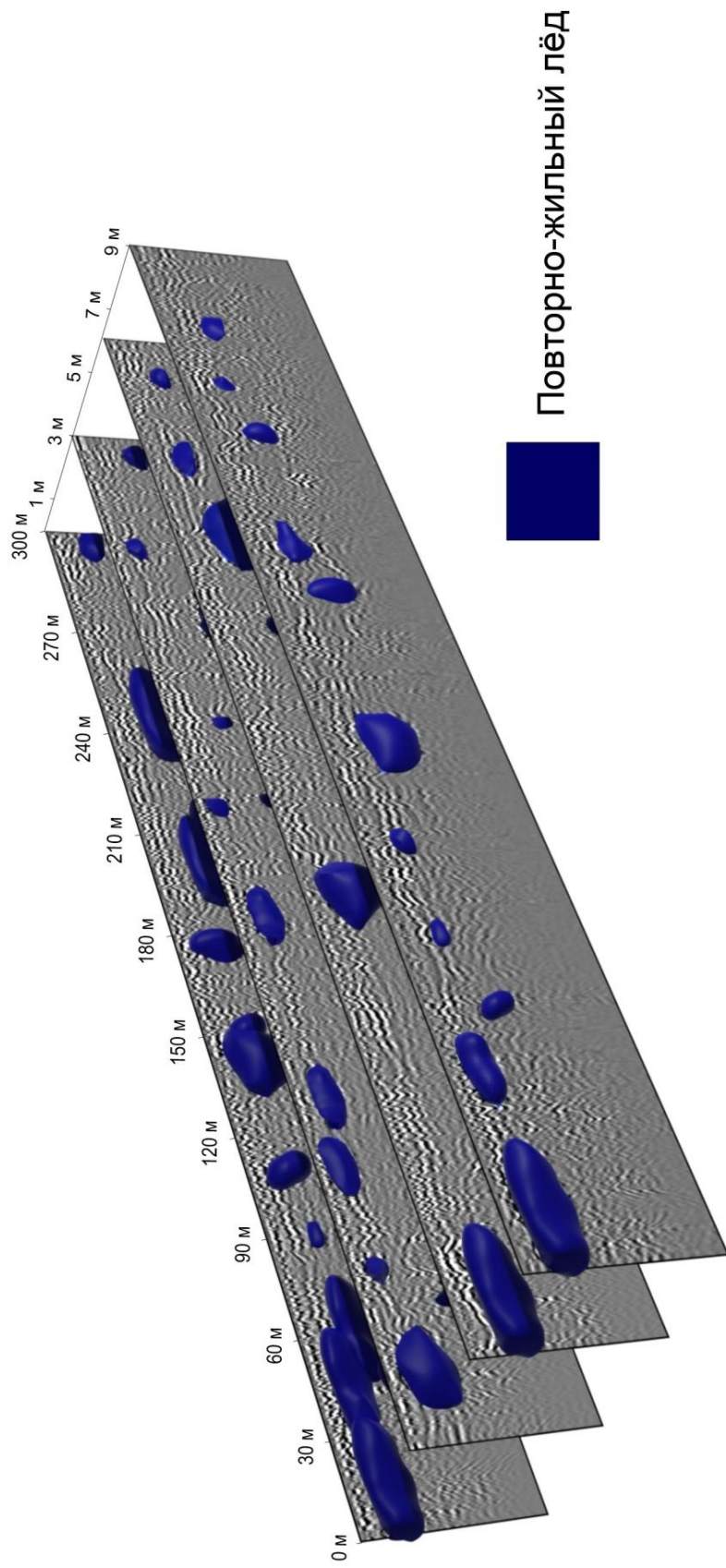


Рисунок 4.11 – Псевдо 3D карта распространения подземных льдов по данным георадиолокации

### 4.3 Картирование кровли ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород на прииске «Молодо»

Для изучения строения массива горных пород исследуемого участка на прииске «Молодо» в апреле 2020 г. проведена площадная съемка методом георадиолокации. Территория участка была расположена рядом технологическим сооружением, т.е. массив горных пород сверху был отсыпан гравийно-галечными породами, для того чтобы поверхность земли была ровной. Георадиолокационные профили были расположены параллельно друг к другу, при этом их длины рассчитывались исходя из размера территории склада и прилегающей площадки (рисунок 4.12).

Выбор эффективной частоты георадара произведен исходя из Технического задания на исследования, в соответствии с которым необходимая глубина составляет 8 - 10 м. Так как работа произведена весеннее время года, когда горные породы находились при максимальном промерзании, нами был выбран георадар "ОКО-2М" с антенным блоком «АБ-250», с центральной частотой 250 МГц. Георадиолокационная съемка произведена в режиме «по перемещению», для измерения расстояния использовался датчик перемещения с колесом (ДП-32). Для получения высококачественных данных скорость движения была не больше 4 км/ч.

На основании имеющейся информации об исследуемом участке выставлены значения параметров сканирования по профилю, представленные ниже:

- глубина зондирования, определяющая временной диапазон регистрации данных в приемнике георадара и влияющая на максимальную глубину сканирования, составляет 200 нс в развертке;
- количество трасс составляет 50 000;
- количество точек в трассе определяет количество точек по вертикали, принимаемых в каждой трассе, что способствует улучшению детализации по глубине и составляет 511;

- число накоплений сигнала равно 8, что позволяет увеличить соотношение сигнал/шум и улучшить визуализацию и глубинность;
- шаг между трассами при длине профиля составляет 10 см;
- диэлектрическая проницаемость среды задается значением из исходной геологической информации и составляет 4,6;
- режимы зондирования – «по перемещению».

Для проведения полевых измерений и сбора данных использован полевой ноутбук с установленным программным обеспечением «GeoScan32». До начала движения отрегулировано вертикальное смещение сигнала, оценен сигнал по амплитуде, форме (очертанию) и затуханию по глубине. В зависимости от выбранного режима работы происходит запись информации в файл, при этом контролируется процесс записи на экране ноутбука.

В процессе измерения на экране по ходу перемещения георадара отображается радарограмма. На радарограмме указывается расстояние, пройденное георадаром, глубина зондирования, время прохождения сигнала. Одинарные метки отмечают скважины, а двойные метки используются для "привязки" к местности участка работы. После завершения измерения по выбранному профилю осуществляется сохранение радарограммы в памяти ноутбука.

Для обработки георадиолокационных данных применено программное обеспечение «GeoScan32». Граф предварительной обработки приведен ниже:

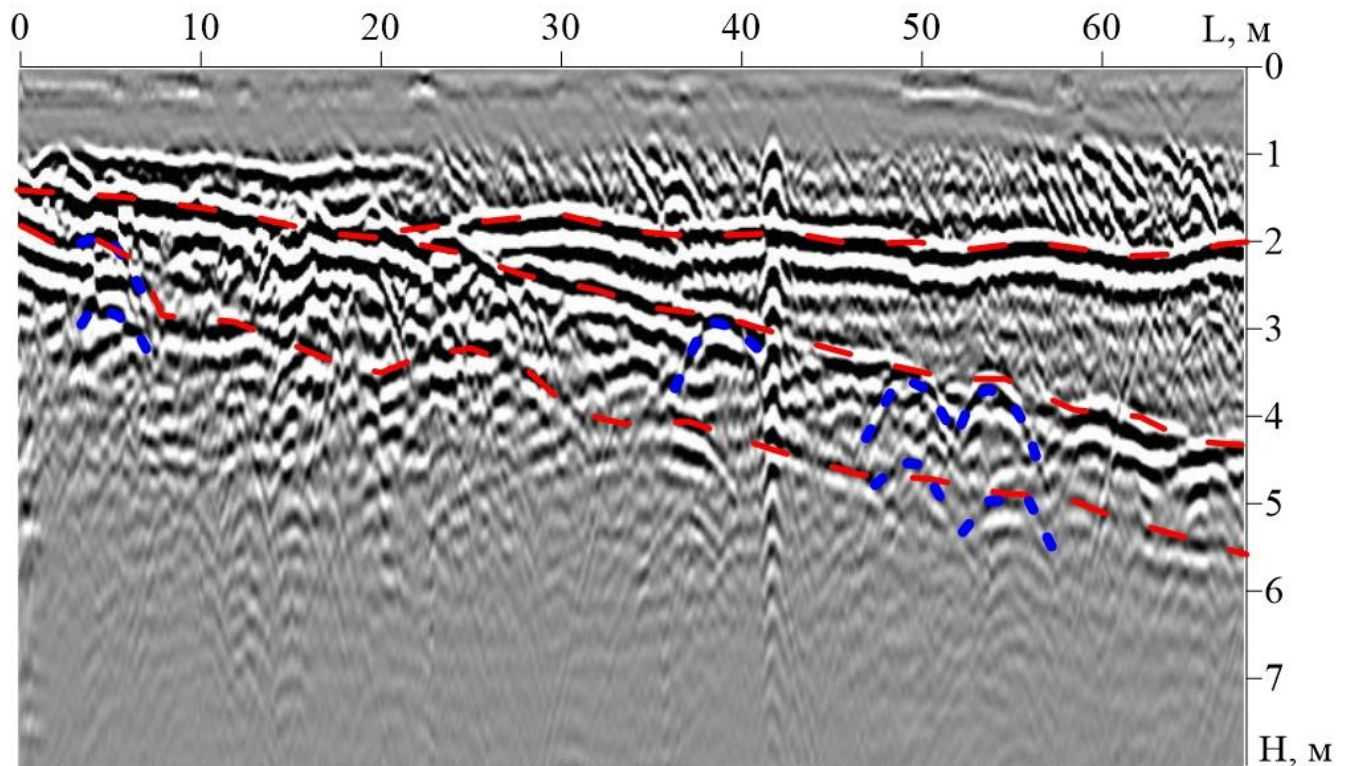
- выполнен реверс соответствующих файлов;
- радарограммы обрезаны в соответствии с участком исследований;
- радарограммы обрезаны сверху, выставлен «ноль»;
- выставлен горизонтальный масштаб (корректировка положения трасс);
- коррекция затухания амплитуд.



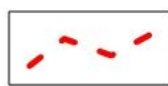
Рисунок 4.12 – Схема георадиолокационных профилей на участке исследования прииска «Молодо» (а); выход льда при бурении скважины (б); фотография обнажения массива горных пород с включением ПЖЛ (в, г)

На основе подтвержденных интерпретационных признаков выявления ПЖЛ на исследуемом участке произведены обработка и интерпретация 11 георадиолокационных радарограмм (обозначены черными пунктирными линиями на рисунке 4.14). На рисунке 4.13 в качестве примера представлена радарограмма после обработки. На ней отмечены красной пунктирной линией геологические границы раздела горных пород в рыхлых отложениях, синей пунктирной линией гиперболические отражения от ПЖЛ. Кроме этого, проявляются хаотичные оси синфазности, характеризующие неоднородности в виде валунов и т.д.

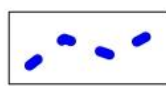
В результате обработки и интерпретации всех 11 георадиолокационных радарограмм построена карта глубины залегания кровли ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород. Цветовая градация обозначает глубину залегания кровли ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород (рисунок 4.14) [107].



Условные обозначения:



Граница раздела  
двух сред



Гиперболическое отражение  
от ПЖЛ

Рисунок 4.13 – Фрагмент радарограммы с выделенными осями синфазности георадиолокационных сигналов ПЖЛ в массиве горных пород

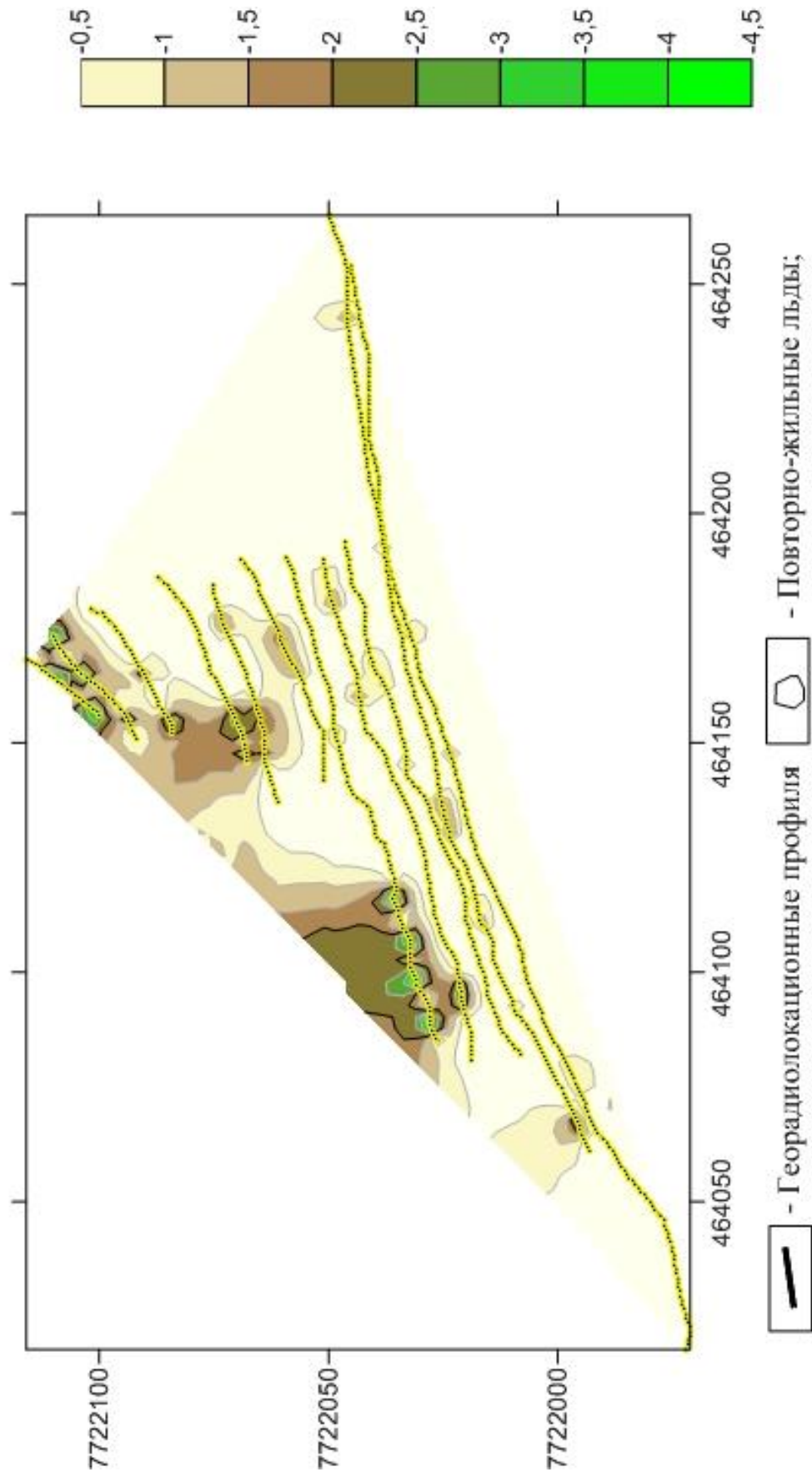


Рисунок 4.14 – Карта залегания кровли ПЖЛ незагнанных термокарстом в массиве мёрзлых горных пород на прииске «Молодо»



## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что методика георадиолокационного картирования ПЖЛ позволила оценить геокриологические условия массива мёрзлых горных пород на участке россыпного месторождения алмазов. Показано, что методом георадиолокации возможно выявить и оконтурить ПЖЛ, незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород.

В дальнейшем полученная информация о строении массива мёрзлых горных пород может способствовать повышению эффективности вскрышных и буровзрывных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена задача обоснования методики георадиолокационного картирования, незатронутых термокарстом ПЖЛ россыпных месторождений криолитозоны, основанной на результатах компьютерного и физического моделирования распространения георадиолокационных сигналов в массиве мёрзлых горных породах.

Основные результаты и выводы выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Установлены геокриологические условия массива горных пород, в том числе размеры ПЖЛ незатронутых термокарстом на россыпных месторождениях криолитозоны для создания физико-геологической модели ПЖЛ.

2. Разработана физико-геологическая модель массива мерзлых горных пород с включением повторно-жильного льда, описывающая геологическое строение изучаемого объекта, значения электрофизических свойств в разрезе и содержащая радарограмму, на которой отображаются георадиолокационное волновое поле, аномалии и различные помехи.

3. На основе результатов компьютерного и физического моделирования распространения георадиолокационных сигналов в массиве многолетнемерзлых горных пород обоснованы критерии выявления ПЖЛ незатронутых термокарстом:

– Наличие двух гиперболических осей синфазности, расположенных одна под другой (наличие двух непрерывных осей синфазности расположенных одна под другой с гиперболическими «хвостами»);

– Повышенная изрезанность формы Фурье-спектра георадиолокационных трасс;

– Противоположность фаз сигналов верхней и нижней осей синфазности;

– Затухание ( $r$ ) электромагнитных волн, рассчитанное по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ,

происходит в соответствии с  $r(\Delta t) = 0,74(\Delta t + k)$ .

4. Разработана и предложена методика картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, отличающаяся комплексным анализом спектральных и динамических характеристик георадиолокационных сигналов.

5. Результаты апробации разработанной методики картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород на буровзрывных блоках прииска «Маят» и на участке горнотехнического сооружения прииска «Молодо», применение георадиолокации для исследования рыхлых отложений россыпных месторождений в криолитозоне продемонстрировало свою эффективность.

Соответствие полученных теоретических представлений и результаты экспериментальных исследований свидетельствует об эффективности применения установленных критериев. Обоснована и апробирована методика картирования ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мерзлых горных породах, служащая основой при производстве вскрышных работ на россыпных месторождениях криолитозоны.

Важнейшим практическим результатом диссертационной работы является реализация разработанной методики георадиолокационного картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ на месторождениях разрабатываемых АО «Алмазы Анабара», при проведении буровзрывных работ на участке «Талахтаах», при горно-геологических работах на участках «Новогодний», «р. Куоллээх» прииска «Маят», а также при инженерно-геологических исследованиях горнотехнического сооружения прииска «Молодо».

Дальнейшее развитие представленной научной работы может состоять в автоматизации обработки и интерпретации данных георадиолокации по методике картирования незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород. Доработка методики предполагает возможность 3D картирования при изучении распространения ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Данилов, Ю. Г. Добыча алмазов в Арктических районах Республики Саха (Якутия) / Ю. Г. Данилов, С. П. Леонтьев // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – № 11 (ноябрь). – Режим доступа: *URL: [http: // e-koncept.ru/2016/16246.htm](http://e-koncept.ru/2016/16246.htm)*.
2. Граханов, С. А. Россыпи алмазов России / С. А. Граханов, В. И. Шаталов, В. А. Штыров, В. Р. Кычкин, А. М. Сулейманов : гл. ред. Д. А. Додин. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2007. – 457 с.
3. Шило, Н. А. Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей / Н. А. Шило – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток : Дальнаука, 2002. – 576 с.
4. Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений Севера : коллективная монография / С. А. Ермаков, А. М. Бураков, И. И. Заудальский, С. В. Панишев ; отв. ред. В. А. Шерстов ; рец. : Б. Н. Заровняев, Л. Л. Федорова, А. С. Курилко ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горн. дела Севера. им. Н.В. Черского. – Якутск : ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. – 372 с.
5. Отчет о результатах геологического изучения, поисков и оценки месторождений алмазов по участку «МАЯТ водораздельный» в 2005-2009 гг. Лицензия ЯКУ 13130 КП : в 7 кн., 3 папках / ОАО «Алмазы Анабара»; отв. исполнители : Иванов П. О., Попков П. А. ; ведущие исполнители: Земнухов А. Л. [и др.]. – Якутск, 2010. – Ч. 1. – 204 с.
6. Додин, Д. А. Минерально-сырьевые ресурсы Российской Арктики - Mineral resources of the Russian Arctic : состояние, перспективы, направления исследований : монография / М-во природных ресурсов РФ, Российская акад. наук, Всероссийский науч.-исследовательский ин-т геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология). – СПб. : Наука, 2007. – 766 с.
7. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Э. Д. Ершов и др. ; под ред. Э. Д. Ершова. – М. : Недра, 1989. – 414 с.

8. Ершов, Э. Д. Петрография мерзлых пород : учебник / Э. Д. Ершов, И. Д. Данилов, В. Г. Чеверев. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 311 с.
9. Никитин, А. А. Комплексирование геофизических методов / А. А. Никитин, В. К. Хмелевской : учебник для вузов. – Тверь : ООО “Издательство ГЕРС”, 2004. – 294 с.
10. Манштейн, А. К. Малоглубинная геофизика : пособие по спецкурсу / А. К. Манштейн ; Новосибирский гос. ун-т, геол.-геофизический факультет. – Новосибирск, 2002. – 135 с.
11. Добровольский, Г. Н. Физико-механические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Крайнего Севера / Г. Н. Добровольский, В. С. Сорокин, Г. О. Киприянов [и др.]. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1978. – С. 71-80.
12. Огильви, А. А. Основы инженерной геофизики : учебник ; под ред. В. А. Богословского. – М. : Недра, 1990. – 501 с.
13. Якупов, В. С. Геофизика криолитозоны : монография / В. С. Якупов ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т космофизических исслед. и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера, ГОУ ВПО «Якут. гос. ун-т им. М.К. Аммосова. – Якутск: Изд-во Якутского государственного университета, 2008. – 342 с.
14. Омеляненко, А. В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород / А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова ; отв. ред. А. М. Снегирев ; рец. : М. А. Викулов, А. С. Курилко, С. А. Ермаков ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.
15. Стогний, Г. А. Геолого-геофизическая модель Центрально-Алданского золоторудного района / Г. А. Стогний, В. В. Стогний // Геофизика. – 2014. – № 3. – С. 49–54.
16. Ним, Ю. А. Импульсная электроразведка криолитозоны / Ю. А. Ним, А. В. Омеляненко, В. В. Стогний ; ред. коллегия : В.Н. Ефремов, Н. В. Попов, В. В. Стогний ; рец. : А. М. Снегирев, В. К. Хмелевский, А. Д. Фролов ; Рос. акад. наук., Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения, Ин-т горн. дела Севера, Гос. комитет РФ по

ВО, Якут. гос. ун-т им. М.К. Аммосова.- Новосибирск : Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1994. –188 с.

17. Якупов, В. С. Исследование мерзлых толщ методами геофизики / В. С. Якупов ; отв. ред. С. А. Батугин ; рец. : В. Г. Алексеев, В. С. Имаев ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горн. дела Севера. – Якутск : ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – 336 с.

18. Фролов, А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. / А. Д. Фролов. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.

19. Седов, Б. М. Сейсмические исследования в районах вечной мерзлоты / Б. М. Седов. – М. : Наука, 1988. – 180 с.

20. Шестернев, Д. М. Исследование криолитозоны методами РСВП / Д. М. Шестернев, А. П. Карасев, В. В. Оленченко. – Новосибирск : Изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 2003. – 236 с.

21. Шмурак, Д. В. Малоглубинная сейсморазведка карстующихся пород / Д. В. Шмурак, В. Л. Владов, А. П. Ермаков [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://istina.msu.ru/media/conferences/conferencepresentation/c06/08e/14735587/XI\\_na\\_uchno-prakticheskaya\\_konferentsiya.\\_SPB\\_9-11.12.15.pdf](http://istina.msu.ru/media/conferences/conferencepresentation/c06/08e/14735587/XI_na_uchno-prakticheskaya_konferentsiya._SPB_9-11.12.15.pdf)

22. Воронков, О. К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов) / О. К. Воронков. – СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева», 2008. – 300 с.

23. Хмелевской, В. К. Геофизические методы исследований / В. К. Хмелевский, Ю. И. Горбачев, А. В. Калинин, М. Г. Попов, Н. И. Селиверсов, В. А. Шевнин. –Петропавловск-Камчатский : Изд-во КГПУ, 2004. – 232 с.

24. Богородский, В. В. Электрические характеристики систем горная порода-лед / В. В. Богородский // Доклады Академии наук СССР. – 1970. – Т. 190. – Вып. 1. – С. 88 – 90.

25. Стогний, В. В. Импульсная индуктивная электроразведка таликов криолитозоны Центральной Якутии : монография / В. В. Стогний. ; Ин-т биол. проблем криолитозоны, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН ;

отв. ред. Г.М. Тригубович ; рец. : С.П. Васильев, А.В. Омеляненко. – Якутск, 2003. – 124 с.

26. Жуков, В. С. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны / В. С. Жуков, Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2020. – № 4. – С. 39 – 50.

27. Лещанский, Ю. И. Электрические параметры песчано-глинистых грунтов в диапазоне УКВ и СВЧ в зависимости от влажности и температуры / Ю. И. Лещанский, А. И. Дробышев. – М. : Информсоюз, 1995. – 26 с.

28. Якупов, В. С. Геофизика криолитозоны / В. С. Якупов. – Якутск : Изд-во Якутского государственного университета, 2008. – 342 с.

29. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М. : Стандартинформ, 2013. – 42 с.

30. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / И. Н. Вотяков. – Новосибирск : Изд-во Наука, 1975. – 174 с.

31. Данилов, И. Д. Подземные льды / И. Д. Данилов. – М. : Недра, 1990. – 140 с.

32. Попов, А. И. Мерзлотные явления в земной коре (Криолитология) / А. И. Попов. – М. : Изд-во МГУ, 1967. – 304 с.

33. Соломатин, В. И. Физика и география подземного оледенения : учебное пособие для вузов / В. И. Соломатин ; отв. ред. В. П. Мельников; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Институт криосферы Земли ; М-во образования и науки РФ ; МГУ им. М.В. Ломоносова. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2013. – 346 с.

34. Скрыбыкин, Н. Н. Техника бурения взрывных скважин в мерзлых породах / Н. Н. Скрыбыкин. – М. : Недра, 1989. – 172 с.

35. Друкованный, М. Ф. Исследование взаимосвязей энергетических характеристик горных пород с их дробимостью / М. Ф. Друкованный, В. М. Комир, Н. И. Мяннина, Л. Ф. Петряшин // Взрывное дело. – М. : Недра, 1969. – № 67/24. – С. 29 – 37.

36. Киприянов, Г. О. Исследование влияния геокриологических факторов на процесс взрывного разрушения многолетнемерзлых осадочных пород / Г. О. Киприянов, В. С. Сорокин // Повышение эффективности открытой угледобычи : сборник научных трудов. – Кемерово. 1989. – С. 137–144.

37. Сорокин, В. С. Исследование влияния некоторых факторов на эффективность взрывного разрушения многолетнемерзлых осадочных горных пород / В. С. Сорокин, Г. О. Киприянов, Г. В. Шубин // Горнодобывающая Якутия на рубеже 3-го тысячелетия : сб. науч. тр. – Нерюнгри : Изд-во Якутского государственного университета, 2000. – С. 51–56.

38. Анчисон, Т. К. Основы взрывного дробления / Т. К. Анчисон // Открытые горные работы ; под ред. Ю. П. Порлейдера. – М. : Недра, 1971. – С. 128 – 145.

39. Судакова, М. С. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге / М. С. Судакова, А. В. Брушков, С. А. Великин, М. Л. Владов, Ю. Д. Зыков, В. В. Неклюдов, В. В. Оленченко, П. Ю. Пушкарев, М. Р. Садуртдинов, А. Г. Скворцов, А. М. Царев // Вестник Московского университета. – Сер. 4. Геология. – 2022. – № 6. – С. 141 – 151.

40. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования геокриологических объектов массива горных пород месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, Е. Э. Соловьев, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 38 – 42. DOI: 10.17580

41. Дягилева, Р. А. Разработка критериев выявления подземного льда на основе компьютерного моделирования георадиолокации массива мерзлых горных пород для инженерно-геологического обеспечения буровзрывных работ / Р. А. Дягилева, К. О. Соколов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 73 – 77. DOI: 10.15372

42. Оленченко, В. В. Геоэлектрическая характеристика побережья острова Самойловский (дельта реки Лена) / В. В. Оленченко, А. А. Картозия, Л. В.



Цибизов, Осипова П. С., Есин Е. И. // Геофизические технологии. – 2018. – № 4. – С. 39 – 49. DOI: 10.18303/2619-1563-2018-4-5. – EDN YYFACD.

43. Селяев, В. А. Особенности методики исследования многолетнемерзлых пород электромагнитными методами на полуострове Ямал / В. А. Селяев, И. В. Буддо, Н. В. Мисюркеева [и др.] // Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна. – М., 2021. – С. 297 – 300.

44. Скворцов, А. Г. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород / А. Г. Скворцов, М. Р. Садуртдинов, А. М. Царев // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 83 – 90.

45. Sokolov, K. Prospecting and evaluation of underground massive ice by ground-penetrating radar / K. Sokolov, L. Fedorova, M. Fedorov // Geosciences (Switzerland). – 2020. – Vol. 10, No. 7. – pp. 1-14 DOI: 10.3390/geosciences10070274. – EDN UJHHJT.

46. Бричева, С. С. Признаки наличия жильного льда в разрезе по данным георадиолокации / С. С. Бричева, В. П. Мельчинов // Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе : сборник тезисов научно-практической конференции, (г. Москва, 16–22 октября 2020 года) ; Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН. – М. : Издательский Дом "Академия Естествознания", 2020. – С. 90 – 94.

47. Manuel Gómez Lende, Enrique Serrano, Luis Jordá Bordehore, Senén Sandoval / The role of GPR techniques in determining icecave properties: Peña Castil ice cave, Picos deEuropa // Earth Surface Processes and Landforms 41(15). May 2016. DOI:10.1002/esp.3976

48. Тумской, В. Е. Георадиолокационное зондирование отложений в пределах деградирующего полигонального микрорельефа в Арктике / В. Е. Тумской, И.В. Прокопович, Д.Е. Едемский, Ф.Д. Едемский // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике ; под ред. В. П. Мельникова и М. Р. Садуртдинова. – 2021. – С. 430 – 433. DOI:10.7868/9785604610848116

49. Jon Engström, Timo Ruskeeniemi, Kimmo Korhonen, Heikki Vanhala, Jukka Lehtimäki, Anne Lehtinen, Lillemor C. Liljedahl, Jens-Ove Näslund, Rickard Pettersson / Evidence of subglacial permafrost revealed by an electromagnetic study on the Greenland ice sheet in Central West Greenland // XI INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERMAFROST. POTSDAM, GERMANY. – 20-24 JUNE 2016. – pp. 941 – 942.

50. Christin Hilbich, Coline Mollaret, Joaquim Perrenoud, Adrian Wicki, Jonas Wicky, Christian Hauck, Lukas Arenson, Pablo Wainstein / Ground ice distribution and volumetric content in rock glaciers in the Chilean Andes – a comparison of geophysical data and ground truth from boreholes // XI INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERMAFROST. POTSDAM, GERMANY. – 20-24 JUNE 2016. – pp. 1021.

51. Thomas Ingeman-Nielsen, Soňa Tomašková, Larsen S.H., Sara Aparício / Surface Geophysical Measurements for Locating and Mapping Ice-Wedges // Conference: Cold Regions Engineering 2012 (ISBN: 9780784412473) At: Quebec City Volume: pages: 634– 643. DOI:10.1061/9780784412473.063

52. Katarina Pukanska, Karol Bartoš, Gašinec Juraj, Roman Pasteka / Measurement of spatio-temporal changes of cave ice using geodetic and geophysical methods: Dobšiná Ice Cave, Slovakia // LicenseCC BY 4.0. – The Cryosphere. - August 2023. DOI:10.5194/tc-2023-110

53. Гриб, Н. Н. Применение геофизических методов для выявления неблагоприятных инженерно-геологических условий на объекте горно-обогатительный комбинат на золото-сурьмяном месторождении «Сентачан» / Н. Н. Гриб, А. А. Сясько, А. В. Качаев, П. Ю. Кузнецов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 4. – С. 133 – 140.

54. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyarov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P. P., Wegner C., Kashina V., Eulenburg A., Dobrotina E., Sidorina I. Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations // Biogeosciences. – 2015. – Vol. 12, No. 2. – pp. 345–363.

55. Нерадовский, Л. Г. Опыт комплексного изучения подземного инъекционного льда / Л. Г. Нерадовский, И. И. Сыромятников, А. А. Урбан, В. П. Мельчинов // Инженерные изыскания. – 2013. – № 3. – С. 46 – 53.

56. Титов, А. В. Физическое и математическое моделирование распространения георадарного сигнала при наличии в разрезе ледяных пластов и жильного льда / А. В. Титов // 10th EAGE Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering Geophysics 2014, Apr 2014. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140361>

57. Едемский, Д. Е. Георадарное обследование полигонально-жильных структур в Арктике / Д. Е. Едемский, В. Е. Тумской, И. В. Прокопович // Мониторинг в криолитозоне : сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (г. Москва, 14–17 июня 2022 года) ; под ред. Р. Г. Мотенко. – М. : "КДУ", "Добросвет", 2022. – С. 381– 388. – EDN GDBRPO.

58. Тархов, А. Г. Комплексование геофизических методов : учебник для вузов / А. Г. Тархов, В. М. Бондаренко, А. А. Никитин. – М. : Недра, 1987. – 295 с.

59. Геофизические методы изучения мерзлых толщ в СССР / сост. : А. Т. Акимов, В. П. Мельников, А. Д. Фролов. – М., 1979. – 30 с. (Региональная разведка и промысловая геофизика . Обзор ВИЭМС).

60. Электромагнитные методы исследования криолитозоны : обзор / сост. : А. Т. Акимов, Т. М. Клишес, В. П. Мельников, А. М. Снегирев ; под. ред. В. Д. Бадалова ; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения. – Якутск, 1988. – 48 с.

61. Боголюбов А. Н. Электропрофилирование на постоянном токе по методу двух составляющих // Методика геофизических исследований при инженерно-геологических изысканиях : Труды ПНИИИС. Т. XV. – М., 1972.

62. Омеляненко, А. В. Геофизическое картирование подповерхностных геологических структур криолитозоны / А. В. Омеляненко, Д. В. Саввин, Н. Д. Прудецкий // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2009 . – Отд. вып. 4 : Дальний Восток-1. – С. 106–113.

63. Федорова, Л. Л. Особенности обработки георадиолокационных данных при исследовании структуры геологических разрезов россыпных месторождений / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Отд. вып. 4 : Дальний Восток-1. – С. 99–105.

64. Соколов, К. О. Выявление границ продуктивного слоя алмазоносной россыпи частотно-временным анализом данных георадиолокации мерзлого горного массива / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 147–151.

65. Саввин, Д. В. Результаты экспериментальных исследований криогенного состояния горных пород методом георадиолокации в условиях открытой разработки месторождений криолитозоны / Д. В. Саввин, А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова, М. Р. Никифорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 300–305.

66. Федорова, Л. Л. Георадиолокация массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, перекрытого электропроводящим слоем / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 310–316.

67. Саввин, Д. В. Динамическая фильтрация георадиолокационных данных мерзлого горного массива неоднородной структуры / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2012. – № 6. – С. 143–147.

68. Fedorova L. L. Georadar researches at exploitation of the mineral deposits of permafrost / L. L. Fedorova, G. A Kulyandin // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4-8, 2012. – Shanghai, China, 2012. – Vol. 2. – pp. 571–574.

69. Прудецкий, Н. Д. Результаты георадиолокационных зондирований на алмазоносных россыпях криолитозоны, приуроченных к тектоническим нарушениям / Н. Д. Прудецкий // Проблемы горной науки: взгляд молодых ученых : материалы научной конференции молодых ученых и специалистов ИГДС СО РАН, посвященной памяти академика РАН Николая Васильевича

Черского (г. Якутск, 7 февраля 2012 г.). – Якутск : Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. – С. 103 –106.

70. Соколов, К. О. Возможности георадиолокации при исследовании разрывных нарушений на месторождениях полезных ископаемых криолитозоны / К. О. Соколов, П. А. Попков, Н. Д. Прудецкий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 3. – С. 351–355.

71. Федорова, Л. Л. Георадиолокационное картирование структурных неоднородностей массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Д. В. Саввин, М. П. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 267 – 273.

72. Прудецкий, Н. Д. Результаты георадиолокационных исследований верхней части коренных пород криолитозоны // Проблемы горных наук: взгляд молодых ученых : материалы Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика РАН Н.В. Черского (г. Якутск, 24-26 марта 2014 г.). – Якутск : Ахсаан, 2014. – С. 80–82.

73. Федорова, Л. Л. Картирование структурных неоднородностей мерзлого горного массива методом георадиолокации / Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин, В. Н. Федоров // Горная промышленность. – 2015. – № 5(123). – С. 99–101.

74. Соколов, К. О. Опыт применения георадиолокации для исследования разрывных нарушений на россыпных месторождениях криолитозоны / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 7. – Спец. вып. 30 : Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. – С. 333–337.

75. Федорова, Л. Л. Изучение горно-геологических условий месторождения «Маят» на основе современных методов обработки данных георадиолокации / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Д. В. Саввин // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 9. – С. 190 – 195.

76. Соколов, К. О. Картирование палеорусел на участках россыпных месторождений криолитозоны методом георадиолокации / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень.

– 2016. – Спец. Вып. 21 : Проблемы комплексного освоения георесурсов. – С. 514–521.

77. Соколов, К. О. Практическое применение георадиолокации для исследования россыпных месторождений алмазов / К. О. Соколов // Горная промышленность. – 2016. – № 6(130). – С. 78–80.

78. Куляндин, Г. А. Георадиолокационные исследования рыхлых отложений на участках вскрышных работ россыпных месторождений криолитозоны / Г. А. Куляндин, Н. Д. Прудецкий // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения (г. Магадан, 05–08 сентября 2017 г.). – Якутск : Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2017. – С. 262–263.

79. Соколов, К. О. Индикационные признаки трещин рыхлых отложений для оценки геокриологических условий месторождений криолитозоны методом георадиолокации / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, Н. Д. Прудецкий // Естественные и технические науки. – 2018. – № 11(125). – С. 174–177.

80. Соколов, К. О. Результаты георадиолокационных исследований трещиноватости горных пород криолитозоны / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, (г. Якутск, 18-20 апреля 2018 г.). в 2 т. – Якутск : Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, 2018. – Т. 2. – С. 178–180.

81. Николаев, С. П. Оценка состояния массива георадиолокационным зондированием для совершенствования буровзрывных работ в условиях криолитозоны / С. П. Николаев, Б. Н. Заровняев, Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Горный журнал. – 2018. – № 12. – С. 9–13.

82. Прудецкий, Н. Д. Аналитический обзор методов исследования трещин в четвертичных отложениях криолитозоны / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов, Л. Л. Федорова // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 11. – С. 185–191.

83. Прудецкий, Н. Д. Георадиолокационные исследования вскрышных горных пород с трещиной заполненной льдом при разработке россыпных

месторождений алмазов Якутии / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов, Р. А. Дягилева // Инженерная и рудная геофизика 2020 : 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020» (г. Пермь, 14–18 сентября 2020 г.). – М: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2020. – С. 128.

84. Прудецкий, Н. Д. Методические особенности георадиолокационного изучения повторно-жильных льдов, не затронутых термокарстом для оптимизации параметров БВР на россыпных месторождениях криолитозоны / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов // Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность : сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (г. Мирный, 15–16 сентября 2021 г.). – Мирный : Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), 2021. – С. 171–172.

85. Tafloo A., Hagness S.C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. – 3 edition. – N.-Y.: Artech House, 2005. – 1006 pp.

86. Kunz K.S., Luebbers R.I. The finite difference time domain method for electromagnetic. - Boca Raton, FL: CRC Press, 1993. – 448 pp.

87. Yee K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1966. – Vol. 14, no. 5. – pp. 302– 307.

88. Иноземцев, М. А. Использование программного обеспечения джипирмакс для моделирования работы георадара / М. А. Иноземцев // «Шарыгинские чтения» : Всероссийская научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 186–193.

89. Warren, C., Giannopoulos A., Giannakis Iraklis. gprMax: open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. // Computer Physics Communications 209 (2016): 163–70.

90. Giannopoulos, A. Modelling Ground Penetrating Radar by GprMax. // Construction and Building Materials 19, no. 10 (2005): 755–62.

91. Шерифф, Р. Сейсморазведка. в 2 т. / Р. Шерифф, Л. Гелдарт ; перевод Е. А. Ефимова. – М. : Мир, 1987. – Т. 1. – 447 с.
92. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных / А. В. Старовойтов. – М. : МГУ, 2008. – 191 с.
93. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию : учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ. 2005. – 153 с.
94. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662819 Российская Федерация. Программа «Двухмерная лучевая модель зондирования неоднородной среды георадиолокаторами серии «ОКО» » / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова, В. В. Константинов ; правообладатель Федер. гос. бюджетное учреждение науки Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад наук. – № 2017615315 ; заявл. 05.06.2017 ; опубл. 17.11. 2017, Бюл. № 11.
95. Russer, P. Electromagnetics, microwave circuit and antenna design for communications engineering / Ed. by C. F. Balanis. – N. – Y.: Morgan and Claypool, 2006. – 123 pp.
96. V. Galdi et al., “Moderately rough surface underground imaging via short-pulse quasi-ray Gaussian beams,” submitted to IEEE Tmns. Antennas Propogat., Oct. 2001.
97. Johns P. B., Beurle R.L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix // Proc. IEE. – 1971. – Vol. 118, no. 9. – pp. 1203 – 1208.
98. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика : учебник / О. И. Фальковский. – 2-е изд., стер. – СПб. : Изд-во «Лань», 2009. – 432 с.
99. Григорьев, А. Д. Методы вычислительной электродинамики / А. Д. Григорьев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 432 с.
100. Kogelnik H., On the propagation of Caussian beams of light through lenslike media including those with a loses or gain variation. – Appl. Opt. – 4. – 1562. (1965).



101. Федоров, В. Н. Электродинамическое моделирование россыпных месторождений при георадиолокации / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова // Радиолокация и радиосвязь : сборник трудов X Всероссийской конференции (г. Москва, 21-23 ноября 2016 г.). – М. : ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2016. – С. 85 –89.

102. Прудецкий, Н. Д. Моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещинами различной ширины / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Института геологии и благородных металлов СО РАН, (г. Якутск, 05 – 07 апреля 2017 г.). – Якутск, 2017. – С. 485 – 490.

103. Федоров, В. Н. Электродинамическое моделирование структурных особенностей массива горных пород россыпных месторождений при георадиолокации / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова // Известия вузов-Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 48 – 51.

104. Владов, М. Л. Георадиолокация : учебное пособие / М. Л. Владов, М. С. Судакова. – М. : Изд-во «ГЕОС», 2017. – 240 с.

105. M. Markovaara-Koivisto. The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal / M. Markovaara-Koivisto, T. Hokkanen, E. Huuskonen-Snicker // В ENG GEOL ENVIRON. – 2014. - №73 (3). – pp. 815 – 823.

106. Прудецкий, Н. Д. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной заполненной льдом / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов, Л. Л. Фёдорова // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2018. – № 11. – С. 107–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-107-113

107. Прудецкий, Н. Д. Методика георадиолокационного картирования не затронутых термокарстом повторно-жильных льдов / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов, П. А. Попков // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 12. – С. 186–192.

108. Нерадовский, Л. Г. Оценки объемной льдистости дисперсных грунтов Центрально-Якутской низменности по данным георадиолокации / Л. Г. Нерадовский // Лед и снег. – 2019. – Т. 59, № 1. – С. 81–92.

109. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. «Правила производства геофизических исследований». – М. : Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве / ПНИИИС Госстроя России, 2004. – 50 с.

110. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3» : техническое описание. Инструкция по эксплуатации. – 2018. – [www.logsys.ru](http://www.logsys.ru).



УТВЕРЖДАЮ

генеральный директор

АО «Алмазы Анабара»

А. А. Огороков

«20» февраля 2024 г.

АКТ

о внедрении научных результатов исследования, полученных  
представителем ИГДС СО РАН Прудецким Н. Д.

Мы нижеподписавшиеся, представители АО «Алмазы Анабара»: главный геолог Желонкин Р.Ю., зам. главного геолога Ремизов В.А. и представители Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Якутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук Института горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук: заведующая лабораторией георадиолокации, к.т.н. Федорова Лариса Лукинична, старший научный сотрудник, к.т.н. Соколов Кирилл Олегович и младший научный сотрудник Прудецкий Николай Дмитриевич составили настоящий Акт о том, что в период с 2019 по 2023 г.г. на основании договора о взаимовыгодном сотрудничестве (№162–02.19 от 11.02.2019г.) разработана и апробирована методика георадиолокационного картирования буровзрывных блоков на разрабатываемых участках АО «Алмазы Анабара».

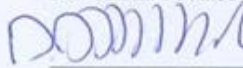
По результатам георадиолокационного исследования с использованием разработанной методики решены задачи по выявлению кровли коренных пород, ПЖЛ, участков талых горных пород и локализации нарушенной структуры коренных пород, а также по картированию мощности песков.

Проведенные теоретические и экспериментальные георадиолокационные исследования на участках россыпного месторождения алмазов «Далдын» в Республике Саха (Якутия) позволили сделать вывод о возможности эффективного применения данной методики георадиолокационного картирования буровзрывных блоков при разработке россыпных месторождений криолитозоны аналогичного типа, что позволило получить трехмерное отображение геологического строения россыпи с выделением ее структурных особенностей (мощность песков, наличия ПЖЛ, гипсометрия и нарушенность кровли коренных пород) и, безусловно, заслуживает дальнейшего внедрения в практику, что имеет большое значение для оперативного контроля полноты и качества выемки алмазоносных песков, обоснование параметров БВР, принятия соответствующих технологических решений.

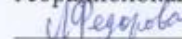
Представители АО «Алмазы Анабара»

Представители ИГДС СО РАН

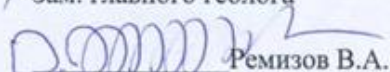
Главный геолог

 Желонкин Р.Ю.

Заведующий лабораторией  
георадиолокации, к.т.н.

 Л. Л. Федорова

Зам. главного геолога

 Ремизов В.А.

с.н.с., к.т.н.

 К. О. Соколов

м.н.с.

 Н. Д. Прудецкий