

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Якутск – 2024

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)

Научный руководитель: **Соколов Кирилл Олегович**, кандидат технических наук, ИГДС СО РАН, старший научный сотрудник лаборатории георадиолокации.

Оппоненты: **Ефремов Владимир Николаевич**, доктор технических наук, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии.

Набатов Владимир Вячеславович, кандидат технических наук, Горный институт Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», доцент кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Защита диссертации состоится « 06 » июня 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.234.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 677980, Россия, г. Якутск, проспект Ленина, д. 43. Тел/факс: 8(4112)33-59-30; e-mail: igds@ysn.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ЯНЦ СО РАН <https://prez.ysn.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук

Зубков Владимир Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 визуально 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. Владова, 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 палеорунами 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 буровзрывным 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 (Δt), 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, идею, цель работы, задачи исследований, защищаемые положения, научную новизну, практическую значимость.

В первой главе приведен аналитический обзор горно-геологических условий разработки россыпных месторождений алмазов Якутии. Приведены электрофизические свойства мёрзлых горных пород россыпных месторождений. Проанализировано современное состояние геофизических исследований массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ.

Во второй главе изучены особенности распространения георадиолокационных сигналов в массиве мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ. Приведены результаты компьютерного и физического моделирования распространения георадиолокационных сигналов в массиве мерзлых горных пород с включением ПЖЛ, которые позволили определить особенности радиофизических характеристик сигналов в зависимости от параметров льда. Определены признаки выявления ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород и обоснована возможность их определения методом георадиолокации.

В третьей главе разработаны методика георадиолокации с использованием обоснованных критериев определения ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород россыпных месторождениях алмазов криолитозоны и алгоритм обработки данных георадиолокации, отличающийся использованием дискретного преобразования Фурье в оконном режиме. Обоснованы параметры проведения полевых работ, приведены примеры обработки и интерпретации данных георадиолокации.

В четвертой главе представлены результаты апробации, разработанной методики изучения массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ незатронутых термокарстом на участках разрабатываемых АО «Алмазы Анабара» россыпных месторождений алмазов криолитозоны, которые подтверждены данными буровых скважин, шурфов и фотосъемкой обнажений бортов горных выработок.

НАУЧНЫЕ 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.

В георадиолокационных волновых полях отображаются, прежде всего, структурные факторы массива горных пород, а также вещественный состав отложений, слагающих изучаемый геологический разрез. Для определения особенностей отображения ПЖЛ в георадиолокационном волновом поле проведено компьютерное и физическое моделирование распространения электромагнитных волн в рыхлых отложениях массива горных пород криолитозоны, содержащих ПЖЛ. Исходные данные для компьютерного моделирования должны содержать структуру, размеры и электрофизические свойства вмещающей горизонтально-слоистой среды и геокриологического объекта (ПЖЛ), а также его форму и глубину залегания.

По результатам анализа ранее проведенных геокриологических исследований россыпных месторождений алмазов криолитозоны установлено, что большинство повторно-жильных льдов имеют форму в виде вертикального столба. На рис. 1 представлена физико-геологическая модель ПЖЛ, где показана модель двухслойной среды (рис. 1а), состоящая из коренных пород, представленных доломитами, и мёрзлых суглинков с включением льда вертикальной формы.

На основе физико-геологической модели (ФГМ) массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ проведено компьютерное моделирование в системе grMax методом FDTD (метод конечных разностей во временной области). В результате моделирования получены синтетические радарограммы (рис. 1б), позволяющие изучить характеристики волновых георадиолокационных полей, связанных с геометрическими параметрами и электрофизическими свойствами ПЖЛ массивов горных пород месторождений криолитозоны.

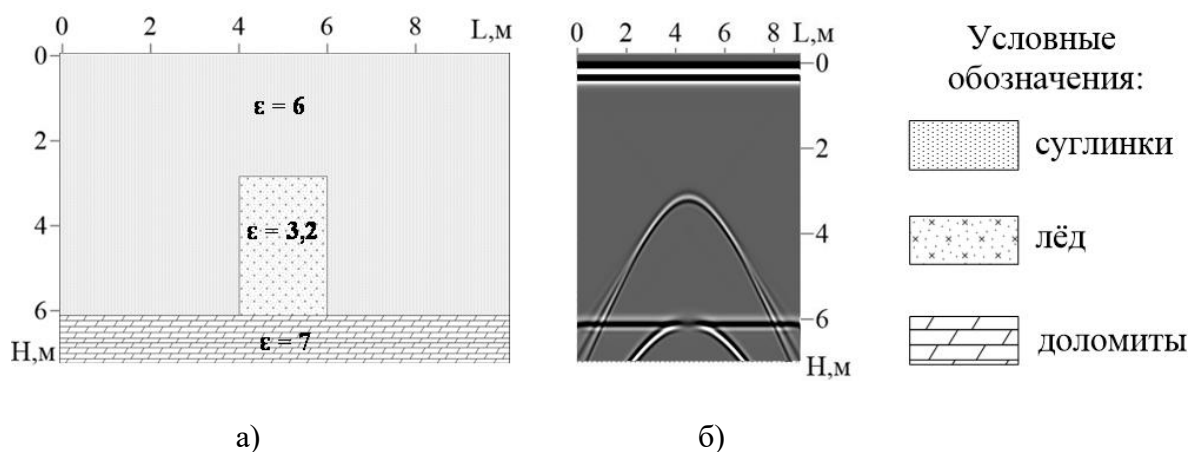


Рисунок 1 – Физико-геологическая модель (ФГМ) массива мёрзлых горных пород с включением ПЖЛ: а) схема ФГМ с диэлектрической проницаемостью горных пород; б) синтетическая радарограмма.

Для физического моделирования георадиолокации повторно-жильного льда произведён выбор геометрических параметров модели с учётом характеристик используемого георадара, на основе формулы радиуса первой зоны Френеля $r = \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{H\lambda}{2}}$, где λ – длина электромагнитной волны

Физическое моделирование (рис. 2) проведено с использованием георадара «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1200, λ которого составляет 0,25 м. Модель массива горных пород с повторно-жильным льдом представлена двумя блоками (1 и 2) мёрзлого речного песка, разделённых речным льдом, перекрытых слоем мерзлого речного песка мощностью (h) от 0 до 0,2 м (рис. 2а). Лёд состоит из двух блоков речного льда высотой (H) 0,32 и 0,20 м, ширина (L) льда в ходе физического моделирования изменялась и составляла (0,25; 0,15; 0,05 м).

В первом эксперименте (рис. 2б) ширина льда составляла 0,25 м, георадар находился в контакте со средой, съёмка начиналась от середины первого блока песка и заканчивалась на середине второго блока песка, при этом лёд был отмечен меткой с двух сторон на георадиолокационных радарограммах (рис. 2г). Измерения были проведены при отсыпке модели слоем песка с шагом 0,05 м до высоты 0,20 м. Во время эксперимента было проведено более 50 георадиолокационных измерений, на которых прослеживаются две гиперболические оси синфазности, дифрагированные на границе между блоками льда и на нижней границе льда. Сигналы, отражённые от верхней границы льда представлены горизонтальной осью синфазности, т.к. на этой глубине первая зона Френеля меньше ширины льда. Гиперболы имеют различную ширину раскрытия, которая увеличивается с глубиной, что также связано с размером первой зоны Френеля. На рис. 2в,е показаны спектральные характеристики георадиолокационных трасс, полученных в точках профиля – 0,4 м и 0,9 м.

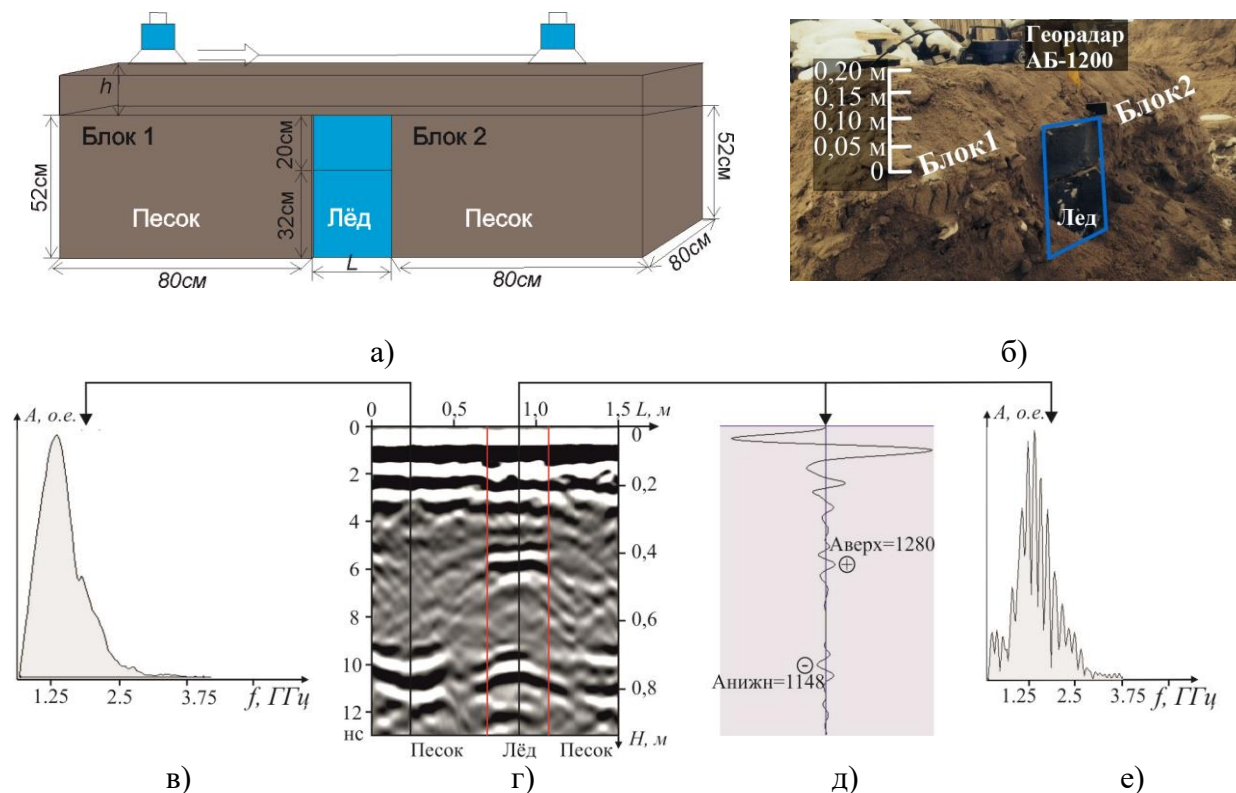


Рисунок 2 – Физическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением жильного льда: а) модель эксперимента; б) фотография модели массива горных пород с включением льда; г) радарограмма; спектральные характеристики георадиолокационных трасс: в) в песке; е) во льду; д) трасса георадиолокационных сигналов

Фурье-спектр (рис. 2е) трассы в месте расположения льда, имеет довольно изрезанную форму, по сравнению со спектром на рис. 2в. Эта особенность объясняется суммированием спектров георадиолокационных сигналов, дифрагированных на поверхности льда, т.к. диаграмма направленности георадара шире блока 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. На рис. 2д представлена трасса георадиолокационных сигналов, на которой видна противоположность фаз сигналов верхней и нижней осей синфазности. В результате физического моделирования георадиолокации повторно-жильного льда определены характеристики отраженных и дифрагированных волн (время регистрации, вариация амплитудных и спектральных характеристик сигналов), которые соответствуют результатам компьютерного моделирования.

Таким образом, на основе анализа динамических и спектральных характеристик георадиолокационных сигналов, возможно выявление незатронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород.

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.

По результатам компьютерного и физического моделирования обоснованы критерии выявления ПЖЛ методом георадиолокации:

- Наличие двух гиперболических осей синфазности, расположенных одна под другой;
- Повышенная изрезанность формы Фурье-спектра георадиолокационных трасс;
- Противоположность фаз сигналов верхней и нижней осей синфазности.

Результаты компьютерного и физического моделирования показали, что по данным критериям возможно выявление неоднородностей в массиве горных пород, имеющих форму, характерную для ПЖЛ. Для однозначной интерпретации данных георадиолокационных измерений разработанные критерии необходимо дополнить условием, основанным на особенностях электрофизических свойств ПЖЛ, которые влияют на амплитудные значения георадиолокационных сигналов, отражённых от верхней и нижней границ льда. Величина этих амплитудных значений зависит от различных факторов (характеристики георадара, электрические свойства вмещающей породы, глубина залегания и др.), но их отношение (затухание) характеризует непосредственно ПЖЛ.

По результатам зондирований на участках россыпных месторождений алмазов «р. В. Маят» и «р. Молодо» рассчитаны затухания (r) электромагнитных волн по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ по формуле:

$$r = 20 \lg \frac{A_{\text{верх}}}{A_{\text{нижн}}} \text{ (дБ)}.$$

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 $r_{\text{м}}$, $r_{\text{вм}}$ (рис. 3). Общий вид графиков схож, т.к. угловый 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:

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

где k – коэффициент чистоты льда, который имеет положительное значение и равняется 3,2 для участка месторождения «р. Молодо», а также отрицательное значение -8 для участка «р. В. Маят».

Для подтверждения корректности уравнения $r(\Delta t)$ использованы данные физического моделирования распространения электромагнитных волн в массиве мёрзлых горных пород, содержащем ПЖЛ, с последующим расчетом r . На рис. 3б представлен график с полученными значениями r , линейная аппроксимация которых соответствует угловому коэффициенту 0,78. Как видно из рисунка, линии графиков физического моделирования и уравнения совпадают, что подтверждает достоверность уравнения $r(\Delta t)$.

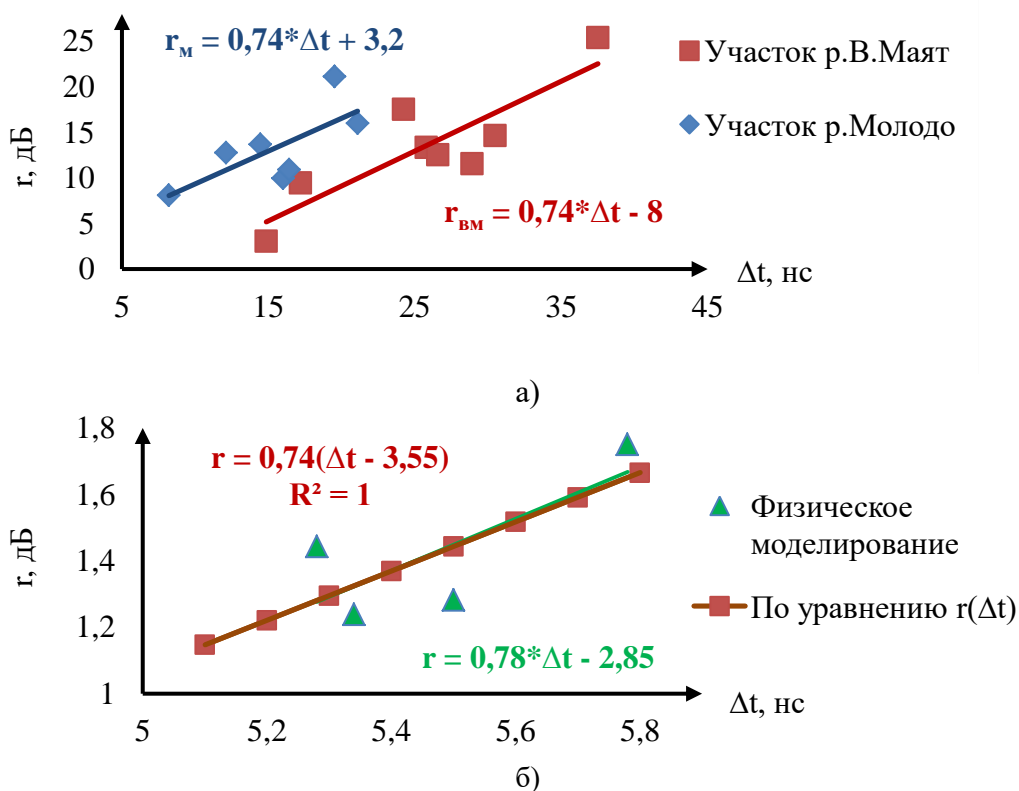


Рисунок 3 – Графики зависимостей затухания амплитуды георадиолокационных сигналов от времени прохождения по результатам: а) полевых измерений; б) физического моделирования

Таким образом, установленная линейная зависимость затухания (r) амплитуд георадиолокационных сигналов от времени прохождения (Δt) дает возможность отличить георадиолокационные сигналы, отраженные от ПЖЛ незатронутых термокарстом, от объектов схожих по форме.

Для того чтобы повысить эффективность метода георадиолокации при изучении ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород, предлагается методика, включающая следующие этапы:

- сбор априорных данных (геологические разрезы по шурфовым данным, буровых скважин);
- выбор аппаратуры и параметров измерения (шаг измерения между точками зондирования, режим зондирования, скорость передвижения радара);
- обработка георадиолокационных данных по разработанному алгоритму;
- интерпретация георадиолокационного разреза на основе разработанных критериев;
- картирование включений ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород.

Сбор априорных данных является одним из основных этапов данной методики. В априорные данные входит информация о рельефе местности, степени залесённости, инженерно-геологическое строение массива горных пород, включая состав и мощность рыхлых отложений, наличие криогенных объектов, в том числе ПЖЛ и талых пород. 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 такие разделы как стратиграфия, тектоника и геоморфология. 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. В связи с этим 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 Анабарской и Приленской 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 которые врезаны унаследованные с верхнечетвертичного времени долины современных водотоков, представляющих несколько типов рельефа: структурно-

денудационный, денудационно-аккумулятивный, денудационно-эрозионный и эрозионно-аккумулятивный.

Выбор аппаратуры и параметров измерения. На основе вышеуказанных априорных данных проводится выбор аппаратуры и параметров георадиолокационной съёмки, обеспечивающих необходимую глубину и точность измерений. В таблице 1 указаны глубины зондирования для антенных блоков для георадаров «ОКО-2». В зависимости от условий пересеченной местности и размеров площади исследования выбирается режим проведения георадиолокационных измерений. Необходимо отметить, что при проведении георадарной съёмки в дискретном режиме максимальный шаг съёмки составляет 1 м, чтобы не пропустить ПЖЛ между точками зондирования.

Таблица 1 – Характеристики антенных блоков георадаров «ОКО-2»

Требуемая глубина, м	Антенный блок, МГц	Режим съёмки
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	

Обработка и интерпретация георадиолокационных данных. Для точной и однозначной интерпретации радарограммы при поиске 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); 2) Редакция данных (удаление отдельных трасс-помех; удаление неинформативных фрагментов радарограммы; прореживание или интерполяция, в соответствии с новым шагом по профилю); 3) Процедуры обработки данных (изменение коэффициента усиления, подавление помех (цифровая фильтрация), вычитание среднего, а также, при необходимости, учёт рельефа местности).

Предложенная методика георадиолокационных исследований, основанная на результатах компьютерного и физического моделирования, позволяет определять местоположение ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород. Данная методика успешно зарекомендовала себя при исследовании участка прииска «Молодо» (АО «Алмазы Анабара»), находящегося в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья на границе с Приленской низменностью.

В результате полевых георадиолокационных исследований, проведенных по предложенной методике, на участке прииска «Молодо» на радарограммах выявлены гиперболические оси синфазности (рис. 4), характеризующие местоположение ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород. Заверка волновых образов подземного льда на радарограммах выполнена по рекогносцировочному профилю, непосредственно примыкающему к

исследуемому участку, вдоль буровой линии и по обнажению массива горных пород. Протяженность профиля составила 230 м, поверхность была расчищена от деревьев и снега (рис. 4а). Заверка проведена по данным буровых скважин, которые пробурены с шагом 4-5 м и отмечены на интерпретационном георадиолокационном разрезе черными вертикальными линиями (рис. 4б).

В рыхлых отложениях отмечены ПЖЛ и пластовые льды, околтуренные черной линией. Синим прямоугольником отмечен участок, на котором имеется обнажение ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород. На рис. 4в показана фотография обнажения, где красной пунктирной линией околтурен 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 георадиолокационных сигналов по центру льда, на которой видна противоположность фаз сигналов, отражённых от нижней и верхних границ ПЖЛ. Фурье-спектр, взятый в области волнового образа льда, имеет изрезанную форму. По этим трём критериям, возможна интерпретация данной волновой картины, как отражения от границ ПЖЛ.

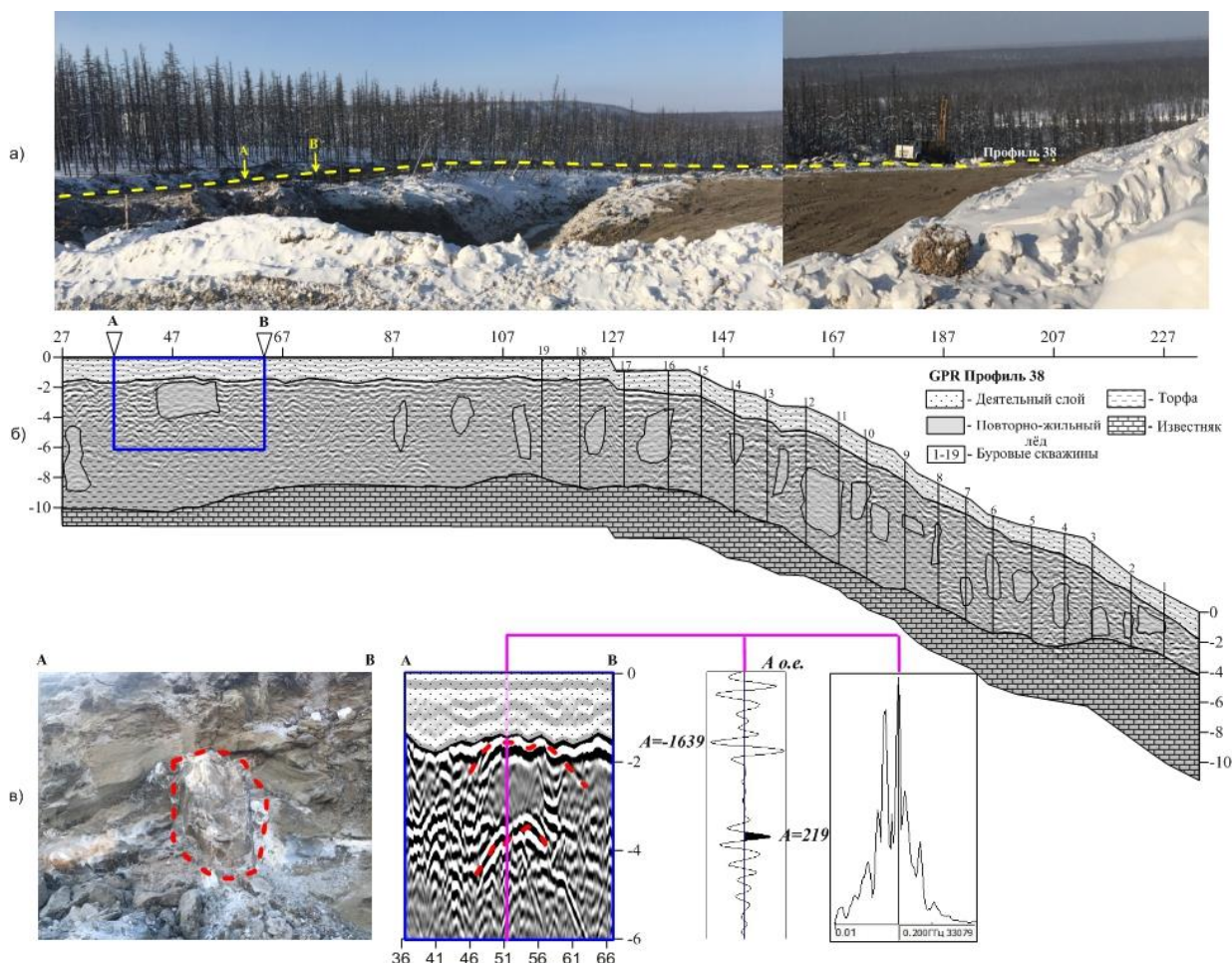


Рисунок 4 – Полевые материалы георадиолокационного исследования ПЖЛ

На основе подтвержденных интерпретационных признаков выявления ПЖЛ на тестовом профиле произведены обработка и интерпретация 11

георадиолокационных радарограмм (профиля показаны на рис. 5 жёлтыми пунктирными линиями). По полученным результатам построена карта глубины залегания кровли ПЖЛ в массиве мёрзлых горных пород. Цветная градация обозначает глубину залегания ПЖЛ.

В результате проведенных исследований установлено, что методика георадиолокационного картирования ПЖЛ позволила оценить геокриологические условия массива мёрзлых горных пород на участке россыпного месторождения алмазов.

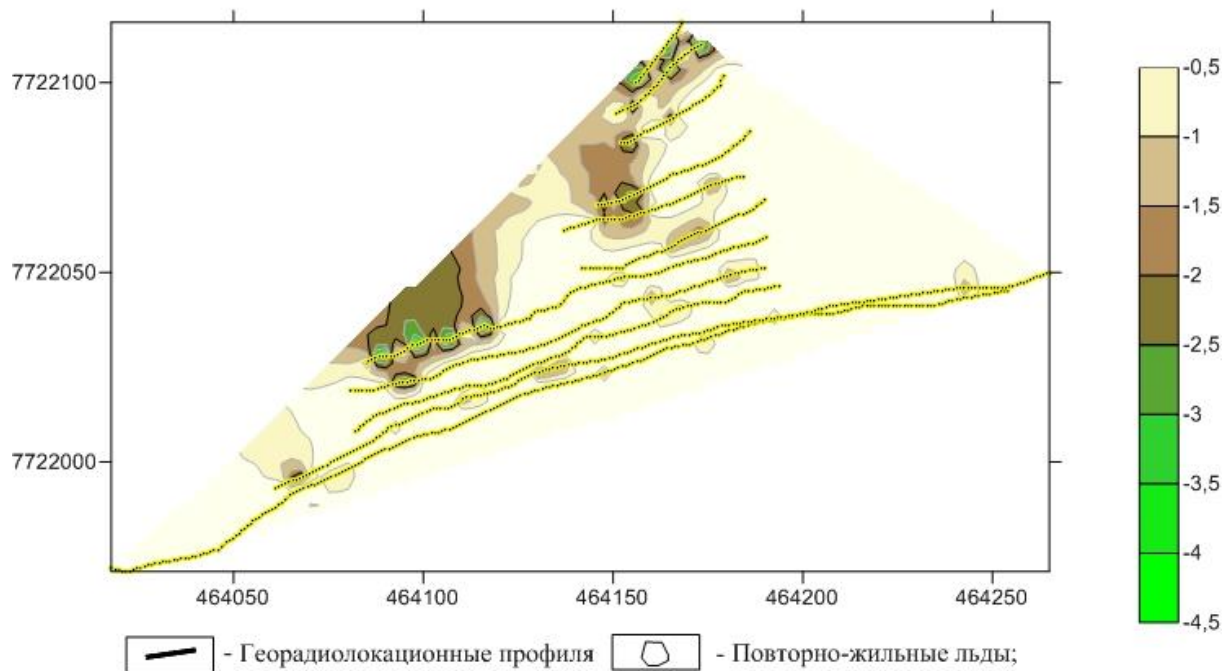


Рисунок 5 – Карта глубины залегания кровли ПЖЛ незатронутых термокарстом в массиве мёрзлых горных пород на прииске «Молодо»

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 пород.

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.

**Основные научные результаты диссертации опубликованы
в следующих работах:**

***В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при
Минобрнауки России:***

1. 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.

2. 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.

3. 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. Федорова // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2018. – № 11 – С. 107–114.

4. Соколов, К. О. Картирование палеорусел на участках россыпных месторождений криолитозоны методом георадиолокации / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий, Л. Л. Федорова // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2016. – Спец. вып. – С. 514-521.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664678 Российская Федерация. Программа «Подсчет локальных максимумов Фурье-спектра данных георадиолокации для выявления повторно-жильных льдов» / Соколов К.О., Прудецкий Н.Д., Дьяконов А.И., Шамаев С.Д. ; правообладатель Федер. гос. бюджет. учреждение науки Федер. исследовательского центра «Якутский научный центр Сиб. отд. Рос. акад. наук. – № 2021663763. – заявл. 07.09.2021 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.09.2021

В прочих научных изданиях:

6. 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: материалы Научно-практической конференции, посвященная 60-летию Якутского научно-исследовательского и проектного института алмазодобывающей промышленности «Якутнипроалмаз», г. Мирный (15-16 сентября 2021 г.). – Мирный. - 2021. – С. 171 – 172.

7. Prudetskii, N. D. GPR studies of overburden rocks with a crack filled with ice during the development of alluvial diamond deposits in Yakutia / N. D.

Prudetskii, K. O. Sokolov, R. A. Dyagileva // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2020, Perm, Sep 2020. – Volume 2020. – pp.1 – 6.

8. Prudetskii, N. D. GPR investigation of ice-filled cracks in loose deposits / N. D. Prudetskii, K. O. Sokolov, L. L. Fedorova, D. V. Savvin // GPR 2018: 17th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. on 18-21 June 2018. – Rapperswil, 2018. – pp. 331 – 334.

9. Федоров, В. Н. Лучевой метод квази-Т-волн при георадиолокационных исследованиях / В. Н. Федоров, Н. Д. Прудецкий, Л. Л. Федорова // Proceedings of the 27th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2017) Sevastopol, Russian Federation, September 10—16. – 2017. – pp. 1562-1568.

10. Куляндин Г. А. Георадиолокационные исследования рыхлых отложений на участках вскрышных работ россыпных месторождений криолитозоны / Г. А. Куляндин, Н. Д. Прудецкий // XI International Symposium on Permafrost Engineering Magadan (Russia) 2017. – Magadan, Russia, 5-8 september, 2017. – pp. 262-263.

11. Prudetskii, N. D. GPR studies of frozen unconsolidated sediments on alluvial deposits cryolithozone / N. D. Prudetskii, G. A. Kulyandin // Cryosol Working Group: VII International Conference on Cryopedology Cryosols in Perfective: A View From the Permafrost Heartland on 21-28 august 2017. – Yakutsk, 2017. – pp. 119-120.

Подписано в печать 27.03.2024. Формат 60x84/16.
Печать цифровая. Печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 52.
Издательский дом Северо-Восточного федерального университета
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5.
Отпечатано в типографии ИД СВФУ