

*На правах рукописи*



**Федорова Лариса Лукинична**

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,  
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Якутск - 2026

**Диссертация подготовлена** в Институте горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН (ИГДС СО РАН) – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ЯНЦ СО РАН).

Официальные оппоненты:

**Александров Павел Николаевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Взаимодействия электромагнитных полей и геологической среды» Центра геоэлектромагнитных исследований – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (г. Троицк),

**Вознесенский Александр Сергеевич**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (г. Москва),

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

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Защита диссертации состоится «26» июня 2026 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИ УрО РАН и на сайте ПФИЦ УрО РАН: <http://www.permsc.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять в двух экземплярах не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, предоставившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78-А. Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02. Электронная почта: [lserg@mi-perm.ru](mailto:lserg@mi-perm.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета, канд. техн. наук

С. Ю. Лобанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации** обусловлена совокупностью геологических, экономических и технологических факторов, определяющих современное состояние минерально-сырьевого комплекса России и, в частности, Республики Саха (Якутия). Горная промышленность остаётся одной из ключевых отраслей экономики: на неё приходится около 30% промышленного производства и свыше 60% экспорта сырья. В *Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса РФ до 2035 г.* подчёркивается необходимость расширения и рационального освоения ресурсной базы, включая россыпные месторождения алмазов, золота, платины и редких металлов, значительная часть которых сосредоточена в Якутии.

Геологическое строение большинства перспективных россыпей Якутии представлено многолетнемерзлыми толщами со сложными и разнообразными горно-геологическими условиями. Процессы сезонного промерзания и оттаивания горных пород в условиях криолитозоны приводят к образованию специфических форм рельефа и влияют на устойчивость массивов горных пород. Для рационального планирования, выбора эффективных технологических схем и безопасного ведения горных работ требуется оперативная, точная и детальная информация о геологическом строении, текущей геокриологической ситуации и физико-механических свойствах мерзлых пород, которая может быть получена геофизическими методами на этапе эксплуатационной разведки.

В условиях усиливающейся конкуренции за инвестиции в горнодобывающие проекты особое значение приобретают технологии, обеспечивающие высокую точность, экономическую и экологическую эффективность разведочных работ. Среди них георадиолокация (ГРЛ) выделяется как один из наиболее перспективных методов благодаря высокому разрешению, неразрушающему способу измерений, компактности аппаратуры и экологической безопасности. Однако применение ГРЛ при изучении россыпей Якутии осложняется рядом научно-практических проблем. Электрофизические свойства мерзлых и талых отложений резко различаются и изменяются сезонно, что усложняет интерпретацию радарограмм. Неоднородность россыпных толщ формирует сложную картину отражений, требующую адаптированных алгоритмов обработки данных. Кроме того, отсутствует научно-обоснованная методика применения ГРЛ для оценки горно-геологических параметров россыпей в условиях криолитозоны, что ограничивает её практическое внедрение.

Таким образом, наблюдается разрыв между потребностями горнопромышленных предприятий и уровнем научно-методического обеспечения георадиолокационных исследований в условиях многолетней мерзлоты. Разработка научно-методических основ георадиолокационной технологии, учитывающей геолого-структурные особенности, физические свойства мерзлых пород и требования цифровизации разведочного процесса, является актуальной научной проблемой и соответствует приоритетам

государственной программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны РФ», а также задачам научно-технологической инициативы по ускоренному развитию минерально-сырьевой базы страны.

**Степень разработанности темы.** Активные радиофизические методы зондирования геологической среды имеют более чем вековую историю. Первые сведения о «радиопрозрачности» осадочных пород и льда принадлежат Н. Lowy и Н. Leimbach (1910–1911), а W. Stern в 1930-х гг. провёл эксперименты по длинноволновому просвечиванию ледников. С развитием импульсной радиолокации в 1950-х гг. сформировалась концепция ГРЛ, работы L. Cook, J. Wait, H. Möller послужили основой теории распространения электромагнитных волн в неоднородных средах.

В СССР исследования по развитию георадиолокации велись в Научно-исследовательском институте горной геомеханики и маркшейдерского дела, Институте геологических наук АН и Геофизическом институте СО АН. В 1960–1970-х гг. В.В. Богородский, Г.В. Трепов, Б.Я. Козлов доказали повышенную радиопрозрачность мерзлых грунтов и впервые выделили сигналы от льдистых и талых разностей. Существенный вклад в развитие метода внес коллектив школы георадиолокации МГУ под руководством М. Л. Владова и А. В. Старовойтова, выполнивший многочисленные исследования на суше и акваториях. П. Н. Александров (ИФЗ РАН) развил теоретические основы метода, предложив решения обратных задач и способы интерпретации данных. Методические подходы для мониторинга горнотехнических объектов Арктики разработали А.И. Калашник и А. Ю. Дьяков (Кольский ФИЦ РАН). В ИНГГ СО РАН (А.А. Черемисин, М.И. Эпов, В.В. Оленченко и др.) создана сверхширокополосная система для георадиолокации низкоомных геологических сред. В ПФИЦ УрО РАН Ю. И. Степанов применил георадиолокацию для изучения мощности многолетнего льда и подземных наледей. В НИТУ МИСиС В.В. Набатов разработал технологию обнаружения пустот и дефектов за обделкой тоннелей. Исследования в криолитозоне под руководством А.В. Омеляненко (Л.Г. Нерадовский, Л.Л. Федорова, К.О. Соколов, И.И. Христофоров, Д. В. Саввин и др.) подтвердили эффективность георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях. Ими предложены эмпирические зависимости диэлектрической проницаемости мерзлого суглинка от льдистости, разработаны различные методики параметрических измерений, проведения съемок с водной поверхности и борта воздушного судна.

Метод георадиолокации для исследования мерзлых горных пород интенсивно развивается в Канаде и Норвегии (A.P. Annan, R. Ogilvy, O. Dredge), где создана база одномерной и двумерной инверсии, опубликованы справочники по комплексам «RAMAC», «SIR-3000». К началу XXI в. появились пакеты обработки данных «REFLEX-W», «GPR-Slice», обеспечившие автоматизированное атрибутивное извлечение геометрических характеристик отражающих границ.

В настоящее время при эксплуатационной разведке месторождений метод георадиолокации применяют без учета структурных особенностей строения россыпей криолитозоны. Отсутствуют алгоритмы обработки и интерпретации данных георадиолокации для оценки криогенного состояния пород и горно-геологических условий россыпных месторождений. Существующие трудности обуславливают актуальность разработки методик измерений, обработки и анализа радарограмм для оперативного выявления геологических и криогенных особенностей, необходимых для обоснования технологических решений и повышения безопасности горных работ.

**Объектом исследований** являются природные и техногенные массивы горных пород при открытых горных работах на россыпных месторождениях криолитозоны.

**Предмет исследования:** закономерности изменения характеристик георадиолокационных сигналов и волновых полей в зависимости от свойств, строения и состояния массива многолетнемерзлых горных пород.

**Цель работы:** разработать научно-методические и технологические основы изучения горно-геологических условий и геокриологических параметров массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны методом георадиолокации, направленные на повышение информативности и достоверности результатов эксплуатационной разведки.

**Задачи исследований:**

- разработка георадиолокационных моделей геологического разреза массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны и научное обоснование возможности эффективного применения метода георадиолокации при их эксплуатационной разведке;
- обоснование параметров и разработка методик георадиолокационных измерений, алгоритмов обработки и интерпретации данных для геокриологических и горно-геофизических исследований мерзлых горных пород;
- разработка методики оценки влажности дисперсных горных пород по данным разносезонных георадиолокационных измерений;
- разработка технологии, позволяющей выявлять участки развития криогенных процессов по данным георадиолокации;
- реализация разработанных методик и программно-аппаратных средств георадиолокационных исследований в комплексе горно-геофизических изысканий при открытой разработке россыпных месторождений криолитозоны.

## **Основные защищаемые положения:**

1. Георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии, построенные на основе анализа результатов численного, физического моделирования и многочисленных натуральных измерений, с учетом электрофизических свойств мерзлых горных пород и региональных климатических условий, достоверно отражают особенности строения и состояния массивов горных пород россыпных месторождений криолитозоны.

2. Разработанные алгоритмы, программно-методическое обеспечение обработки данных, интерпретационные признаки и критерии, учитывающие установленные закономерности изменения характеристик георадиолокационных сигналов и особенности формирования радарограмм при зондировании массивов мерзлых горных пород, обеспечивают корректную оценку горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны.

3. Методика георадиолокационного мониторинга, основанная на применении установленной эмпирической связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности горных пород ( $7\% < W < 25\%$ ), учитывающей криогенное состояние и вещественный состав исследуемых дисперсных горных пород, позволяет оценить их влажность по данным разносезонных георадиолокационных измерений.

4. Технология наземных и дистанционных георадиолокационных измерений для решения задач исследования горно-геологических условий массивов многолетнемерзлых горных пород позволяет:

- прослеживать границы продуктивных горизонтов россыпных месторождений криолитозоны;
- определять местоположение структурных особенностей строения массива горных пород;
- картировать пространственное распределение геокриологических объектов разрабатываемого массива горных пород.

5. Технология выявления участков развития криогенных процессов в массивах горных пород, основанная на анализе волновых картин радарограмм режимных георадиолокационных наблюдений, позволяет проводить мониторинг криогенного состояния грунтов оснований горнотехнических сооружений, эксплуатируемых при освоении россыпных месторождений.

## **Научная новизна выполненных исследований:**

1. Разработан комплекс георадиолокационных моделей верхней части разреза массива многолетнемерзлых горных пород, достоверно отражающих особенности строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны. Построены георадиолокационные модели геокриологических разрезов, включающие подземный лед и талик; геологические разрезы россыпных месторождений криолитозоны с отображением палеорусел, участков валунистости, строения дражного полигона.

2. В результате численного и физического моделирования установлен эффект пространственного гармонического резонанса на длинах волн, соизмеримых с геометрическими размерами подземных льдов, проявляющегося в виде режекции спектра частот георадиолокационных сигналов.

3. Экспериментальными исследованиями выявлен эффект накопления заряда на контрастных по электропроводности границах раздела сред при георадиолокационном зондировании и доказана возможность использования суммарного эффекта индукционного заряда среды и дифракции электромагнитных волн на неоднородностях массива для выделения зоны повышенной и пониженной проводимости, а следовательно, проведения качественной и количественной оценки состояния исследуемой среды.

4. В результате численного, физического моделирования и экспериментальных георадиолокационных исследований выявлены основные закономерности изменения параметров георадиолокационных сигналов и особенности радарограмм, позволяющие оценить горно-геологические условия россыпных месторождений криолитозоны: геологическое строение, состав и свойства слагающих пород, наличие геокриологических объектов, развитие криогенных процессов.

5. Экспериментальными георадиолокационными исследованиями дисперсных горных пород установлена зависимость относительного снижения скорости распространения высокочастотной электромагнитной волны в породах ( $N_v$ ) в талом состоянии по сравнению с мерзлым от их влажности ( $W$ , %) в диапазоне 7-25%, аппроксимируемая формулой  $N_v = 1,55 \cdot W + c$ , где  $c$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава горной породы.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в научно-методическом обобщении результатов георадиолокационных исследований в криолитозоне и разработке типичных георадиолокационных моделей верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии, в разработке критериев интерпретации георадиолокационных разрезов для оценки горно-геологических условий и геокриологической обстановки участков разрабатываемого месторождения. Полученные результаты являются важной составляющей фундаментальных исследований изменения геомеханических свойств массивов многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений криолитозоны при их эксплуатации в условиях глобального изменения климата.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методология и базирующиеся на ней методики георадиолокационных исследований позволяют прослеживать границы продуктивных горизонтов, определять местоположение зон нарушенностей строения массивов горных пород, картировать пространственное распределение геокриологических параметров разрабатываемого массива горных пород, что имеет важное значение при выборе наиболее рациональных технологических решений открытой

разработки россыпных месторождений и обеспечения безопасности проведения горных работ. Результаты настоящего исследования являются важнейшей предпосылкой для трансформации георадиолокации из вспомогательного в базовый метод эксплуатационной разведки россыпных месторождений в Якутии.

**Методы исследований:** анализ и обобщение литературных источников, лабораторные, опытно-методические и экспериментальные работы, компьютерное, физическое и математическое моделирование, сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментов, методы математической статистики, обработка, интерпретация и анализ данных георадиолокации.

**Достоверность** полученных автором результатов подтверждается компьютерным, математическим и физическим моделированием, большим объемом экспериментальных и натурных измерений, полученных с применением разработанных технологий и методик исследований, обработкой и интерпретацией данных георадиолокации, подтвержденных бурением.

**Личный вклад автора.** Представленная диссертационная работа является обобщением исследований, выполнявшихся с 2000 по 2025 гг. в лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН. Все результаты получены автором лично, под ее руководством и при непосредственном участии автора во всех этапах проектирования и выполнения научно-исследовательских и проведения полевых работ, обработки и интерпретации результатов.

**Публикации.** Основные положения исследований отражены в 132 публикациях, в том числе в 42 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в 2 монографиях, в 1 патенте, в 4 прикладных программах и в 2 базах данных.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований представлены на международных научных конференциях: «Современные технологии освоения минеральных ресурсов» (Красноярск, 2008), «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2010, 2013), International Conference on Ground Penetrating Radar (Shanghai, 2012; Brussels, 2014; Hong Kong, 2016; Rapperswil SG, 2018), международных симпозиумах по проблемам инженерного мерзлотоведения (Мирный, 2011; Магадан, 2017), «Problems of Complex Development of Georesources» (Хабаровск, 2009, 2020, 2022; Харбин, 2025), «Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics» (Perm, 2020; Gelendzhik, 2021), «Earth and Environmental Science» (Vladivostok, 2020), «Неделя горняка» (Москва, 2011-2025), «Георадар» (Москва, 2017 - 2023), а также на всероссийских и региональных научно-практических конференциях: «Безопасность горного производства в Республике Саха (Якутия)» (Якутск, 2008, 2023), «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России» (Якутск, 2014, 2016, 2018, 2022), «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых

полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (Якутск, 2011-2025) и на Объединенном ученом совете ЯНЦ СО РАН (Якутск, 2025).

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Исследования по теме проводились в рамках этапов плановых НИР ИГДС СО РАН: проект 7.7.3.3. «Разработка концепции и основ конструирования эффективных технологий освоения и сохранения недр криолитозоны, в том числе адаптированных к кластерной организации рудного вещества» (№ гос.рег. 01.2.00706516, 2007-2009 гг.), проект VII. 60.4.2. «Разработка основ новых геотехнологий эффективного освоения месторождений кластерного строения в условиях криолитозоны» (№ гос.рег. 01201050749, 2008-2012 гг.), проект «Исследование и разработка эффективных конструктивных и технологических параметров подземной и открытой геотехнологии, методов освоения недр криолитозоны» (№0382-2016-0001, 2013-2020 гг.), проект «Научное обоснование и разработка рациональных, природоохранных геотехнологий и их элементов, методов и технических средств освоения месторождений твердых полезных ископаемых Севера со сложными горно-геологическими и природно-климатическими условиями разработки» (№122011800086-1, 2021-2025 гг.). Также исследования были поддержаны грантами РФФИ №15-45-05119 «Георадиолокационное исследование взаимосвязи особенностей структуры рыхлых отложений Арктики с разрывными нарушениями» (2015-2017 гг.), РФФИ №18-45-140061 «Георадиолокационное исследование опасных криогенных процессов в грунтах оснований горнотехнических зданий и сооружений (копров, защитных дамб, автодорог и т.п.) в режиме мониторинга» (2018-2021 гг.), РФФИ №22-27-00751 «Разработка научно-методических основ дистанционного изучения строения ледяного покрова на затороопасных участках Северных рек методом георадиолокации» (2022-2023 гг.).

Исследования по теме диссертации имеют целевую практическую направленность и частично выполнены в рамках хоздоговоров: «Исследование структуры массива и выявление границы скальных выходов на террасовой части россыпи р. Б.Куранах полигона драги №79» (заказчик ЗАО ГДК «Алдголд»); «Инженерно-геофизические изыскания на месторождении «Джекконда»» (заказчик ООО «Прогресс»); «Исследование возможности применения метода георадиолокации для детального изучения дражных полигонов при разработке россыпных месторождений криолитозоны» (а/с «Дражник»); а также на участках месторождений р. Маят, р. Молодо, р. Далдын (АО «Алмазы Анабара»), Кангаласский угольный разрез (ПАО «Мечел»).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 259 наименований. Общий объем работы – 259 стр., 15 табл., 117 рис.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. А.В. Омеляненко за консультации, советы и постоянную всестороннюю помощь на всех этапах научных исследований, д.т.н. Л.Г. Нерадовскому за многолетнее сотрудничество в области георадиолокационных исследований и моральную поддержку в ходе подготовки настоящей работы. Приношу благодарность В.В. Помозову, генеральному конструктору ООО «Логис», за содействие в реализации разработанных алгоритмов обработки георадарных данных. Спасибо за огромную помощь и энтузиазм сотрудникам лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН, принимавшим участие в выполнении проектов, связанных с представленной работой.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**В первой главе «Современное состояние методов оценки свойств, строения и состояния массива горных пород на месторождениях криолитозоны»** показано, что россыпные месторождения Якутии характеризуются неоднородностью горно-геологических и изменчивостью геокриологических условий, которые существенно влияют на эффективность и рациональность их освоения. Небольшая мощность рыхлых отложений россыпей криолитозоны, обрабатываемых открытым способом (глубина залегания около 60% россыпных месторождений не более 10-20 м), и состав пород (слабопоглощающие немагнитные среды) приемлемы для изучения методами высокочастотной электроразведки, из которых наиболее перспективным представляется метод георадиолокации. Рассмотрен опыт георадиолокационных исследований, проводимых на различных месторождениях полезных ископаемых. Анализ современного состояния метода георадиолокации показал, что его потенциальные возможности на практике реализуются не полностью.

**Во второй главе «Разработка георадиолокационных моделей массива горных пород криолитозоны»** изложены основы электродинамического моделирования неоднородной среды с учетом энергетических потерь георадиолокационного сигнала и результаты построения георадиолокационных моделей разрезов алмазоносных россыпей Субарктической зоны и золотоносных россыпей Умеренной зоны при их дражной отработке, а также для разрезов, содержащих подземные льды, участки таликов, сезонно-талый слой и наледи. Анализ результатов моделирования и полевых георадиолокационных измерений позволил установить характеристики волновых полей (время регистрации, вариации амплитудных значений дифрагированных и отраженных волн), зависящие от геометрических размеров геокриологических объектов и вмещающих сред.

**В третьей главе «Алгоритмы, программно-информационное обеспечение обработки и интерпретации данных георадиолокации»** на основе анализа кинематических и динамических характеристик сигналов, особенностей волновых полей георадиолокации определены интерпретационные признаки участков неоднородностей геологического строения массива горных пород. Представлены разработанные алгоритмы и программное обеспечение обработки данных георадиолокации массивов горных пород, позволяющие определить морфологическое строение участка исследования и картировать его структурные неоднородности. Приведены примеры реализации разработанных алгоритмов при обработке данных георадиолокации, в результате которых выявлены зоны повышенной трещиноватости, валунов, границ реликтовых водотоков и т.д. Разработан и апробирован алгоритм построения объемного изображения подповерхностного объекта, учитывающий параметры геофизических измерений, а также форму и строение изучаемой геокриологической структуры.

**В четвертой главе «Методика оценки влажности дисперсных горных пород и грунтов методом георадиолокации»** описаны экспериментальные исследования скорости распространения электромагнитных волн в мерзлых горных породах в процессе их оттайки. Представлена разработанная модель связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности дисперсных горных пород, описываемая эмпирической формулой, учитывающая криогенное состояние и вещественный состав горных пород. Для оценки влажности дисперсных горных пород и грунтовых оснований инженерно-технических сооружений разработана методика разносезонных измерений (в периоды полного промерзания и полной оттайки пород), результаты которых позволяют на основе анализа изменений кинематических характеристик георадиолокационных сигналов, отраженных от «опорной» границы, оценить весовую влажность пород, перекрывающих эту границу.

**Пятая глава «Технология георадиолокационных зондирований при изучении горно-геологических условий разрабатываемого массива»** посвящена анализу параметров георадиолокации, возможностям современной георадиолокационной аппаратуры на примере георадаров «ОКО» и обоснованию технологии проведения полевых измерений, обеспечивающей глубину и детальность исследований, достаточных для картирования геологического строения и оценки геокриологических условий разработки россыпных месторождений криолитозоны. Представлена разработанная методика георадиолокационных зондирований дражных полигонов россыпных месторождений криолитозоны для выявления структурных особенностей геологического строения россыпи (мощность песков, участки повышенной валунистости, гипсометрия и нарушенность плотика). Предложена технология георадиолокации в дистанционном режиме с борта воздушного судна, включающая непрерывное профилирование протяженных и площадных участков исследований, где проведение наземных зондирований невозможно.

**В шестой главе «Георадиолокация при инженерно-геологических изысканиях на участках ведения горных работ»** приведены результаты апробации и практического применения разработанной технологии георадиолокационных наблюдений в режиме мониторинга для выявления и контроля развития криогенных процессов. Представлен программно-методический комплекс георадиолокационного мониторинга криогенного состояния массива горных пород, включающий специализированный алгоритм для выявления негативных криогенных процессов и оценки влажности пород, позволяющий систематизировать, хранить в базе данных (БД), отображать результаты измерений и обработки в геоинформационной системе (ГИС). Комплекс обеспечивает достоверную интерпретацию данных георадиолокации на основе установленных признаков волновых полей, связанных с участками повышенной влажности, пучения пород, зон суффозии.

## **ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ**

### **Первое защищаемое положение**

*Георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии, построенные на основе анализа результатов численного, физического моделирования и многочисленных натурных измерений, с учетом электрофизических свойств мерзлых горных пород и региональных климатических условий, достоверно отражают особенности строения и состояния массивов горных пород россыпных месторождений криолитозоны.*

Для исследования и обоснования эффективности метода георадиолокации, разработки методики полевых георадиолокационных работ и выбора методов обработки, определения критериев интерпретации данных построены георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений криолитозоны. Георадиолокационная модель как физико-геологическая модель (ФГМ) для георадиолокационных исследований представляет собой сложную конструкцию, в которой обобщенно описывается состав, структура и геометрия изучаемого объекта, распределение его петрофизических свойств в пространстве, плане и разрезе. Основная часть этой конструкции – это радарограмма, сформированная в результате компьютерного или физического или натурального моделирования, на которой отображаются характер георадиолокационных волновых полей, их интенсивность, морфология, аномалии и различные помехи.

Россыпные месторождения золота и алмазов Якутии различны по возрасту, генезису и морфологии, что определяет их весьма разнообразное геологическое строение. По глубине залегания россыпных месторождений Якутии можно выделить: мелкие – глубина менее 3 м, очень неглубокие – 3-6 м, неглубокие – 6-12 м, средней глубины – 12-20 м, глубокие – 20-50 м, очень глубокие – более 50 м.

Неоднородности в массиве россыпных месторождений криолитозоны генетически многообразны по формам проявления. Одним из главных факторов образования россыпей является эрозионно-аккумулятивная деятельность речных потоков, которые размывают коренные породы, переносят обломочный материал и отлагают их в речных долинах. Геологический разрез россыпных месторождений криолитозоны характеризуется преимущественно слоистой структурой, с включением структурных нарушений: зон карста, разломов, валунистости, приуроченных к сосредоточению полезного ископаемого.

Для построения георадиолокационных моделей обобщение геологического строения массива горных пород разрабатываемых месторождений и анализ геофизических свойств проведены в пределах Субарктической и Умеренной климатических зон Якутии. Компьютерное моделирование для построения синтетических радарограмм проведено в программе *gprMax*. Для подтверждения аномальных зон радарограмм при моделировании использовалась авторская программа электродинамического моделирования.

Основные построенные георадиолокационные модели массива мерзлых пород россыпных месторождений Субарктической зоны Якутии представлены в таблице 1, где модель 1А – горизонтально слоистый разрез, модель 2А – разрез с включением зоны структурной неоднородности, модель 3А – разрез участка с пластовым льдом, модель 4А – разрез с включением повторно-жильного льда (ПЖЛ).

Горизонтально-слоистая структура массива мерзлых рыхлых отложений (модель 1А) отображается на радарограммах протяженными осями синфазности отраженных волн. Исходными данными для этой модели послужили результаты геофизических исследований на месторождении р. Маят – «Участок 330». Геофизические данные подтверждены результатами бурения скважин. По осям синфазности дифрагированных волн рассчитаны диэлектрические проницаемости ( $\epsilon$ ) горных пород, по составу пород определены значения УЭС ( $\rho$ ) для каждого слоя. По данным бурения до глубины 3 м вскрыты слабоглистые илисто-глинистые отложения ( $\epsilon=5,8$ ;  $\rho=10^3$  Ом\*м). Ниже, с 3 м до 8 м, – слой мерзлого песка сероватого цвета ( $\epsilon=9,3$ ;  $\rho=5*10^3$  Ом\*м). От 8 до 12 м прослежен субгоризонтальный, плотный слой алевролита темно-серого цвета ( $\epsilon=21$ ;  $\rho=10^4$  Ом\*м). Коренные породы – доломит светло-серого цвета, тонкозернистый, плотный, массивный ( $\epsilon=5$ ;  $\rho=5*10^3$  Ом\*м).

На основе полученных данных построена геологическая модель (табл. 1, 1а), согласно которой проведено компьютерное моделирование и получена синтетическая радарограмма (табл. 1, 1б) для георадара с центральной частотой 50 МГц. В местах криволинейности границ раздела геологических слоев горизонтальная форма осей синфазности искажается в результате образования дифрагированных волн.

Таблица 1. Георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Субарктической климатической зоны

№	Назв.	Геoeлектрический разрез	Синтетическая радарограмма	Результат полевых ГРЛ зондирований
		а	б	в
1	1А			
2	2А			
3	3А			
4	4А			

Георадиолокационная модель 2А построена на основе анализа данных, полученных по методике непрерывного профилирования по буровой линии 104 участка «Верхняя Кула» месторождения алмазов р. Маят. После предварительной обработки на разрезе выделена граница осадочных и коренных пород на глубине 5 м. На этом разрезе выделяется аномальная зона на отметках 10-140 м,

представленная хаотичными сигналами, приуроченными к коренным породам (доломиты) с нарушенной структурой, и связанная с соответствующим увеличением отражающих границ. На основе анализа амплитудных значений сигналов радарограмм георадиолокационного моделирования и натуральных измерений установлено, что относительно сглаженное изменение дисперсии амплитуд соответствует слоистой структуре, а хаотично-распределенное изменение дисперсии амплитуд – нарушенной структуре с локальными неоднородностями, такими как палеоруслы, западения плотика, валунистость и т.д.

Одним из горно-геологических условий, существенно влияющих на эффективность и рациональность освоения месторождений, является наличие подземных льдов в массиве горных пород. Например, как показывает практика выполнения буровзрывных работ, расположение скважин по сетке без учета распределения подземных льдов на взрывном блоке приводит к выходу негабаритов и снижению качества дробления пород.

На радарограммах модели 3А (массив горных пород с пластовым льдом) наблюдается изменение фазы сигнала, отраженного от нижней границы слоя льда, по сравнению с сигналом от его верхней границы. На радарограмме ниже отражений от границ льда присутствуют кратно отраженные сигналы. Графики Фурье-спектра трасс, полученных на участках с пластовым льдом, имеют «изрезанную» форму. Это объясняется тем, что лед выступает в качестве гребенчатого режекторного фильтра. Подобные эффекты описаны в теории распространения электромагнитных волн в слое электрически менее плотного вещества внутри более плотного непоглощающего (в нашем случае лед внутри слоя горных пород). Эти особенности радарограммы подтверждаются результатами физического моделирования георадиолокации массива пород с пластовым льдом в лабораторных условиях.

В таблице 1 георадиолокационная модель 3А представлена по результатам интерпретации данных георадиолокационного профиля вдоль буровзрывного блока месторождения р. Маяк, на котором был выявлен участок с включением пластового льда. Из представленного сегмента радарограммы видно, что слой льда толщиной более 1 м прослеживается на отрезке 8-20 м, во временном диапазоне 25-50 нс, что соответствует глубине 1-2,5 м. Подземный лед залегает в толще песков на коренных породах и перекрыт торфами. Георадиолокационные сигналы, позволившие его обнаружить, – это отражения от верхней границы льда, которые формируют непрерывную высокоамплитудную ось синфазности.

Модель 4А получена по результатам интерпретации данных георадиолокационных исследований автозимника «Молодо-Джарджан». Результаты исследований показали, что георадиолокационная модель ПЖЛ представлена волновым полем, содержащим две гиперболические оси синфазности сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ и характеризующихся изрезанной формой Фурье-спектра. На радарограмме модели 4А выделенный по дифрагированным волнам-гиперболам ПЖЛ обозначен белым

контуром. Индикатором конусовидной формы ПЖЛ являются изогнутые вверх оси синфазности сигналов, отраженных от границы слоев вмещающего массива горных пород.

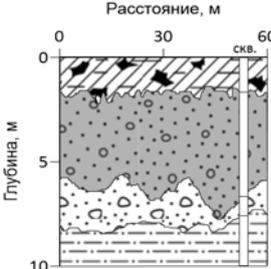
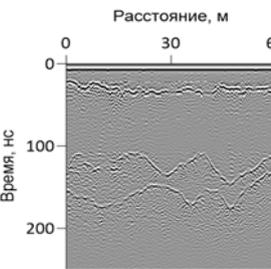
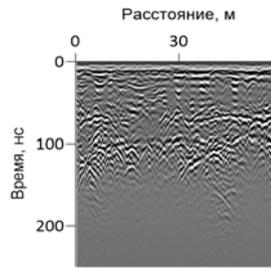
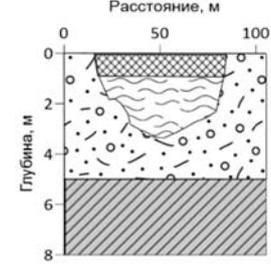
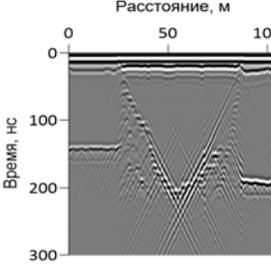
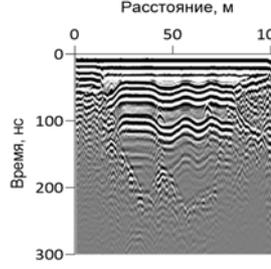
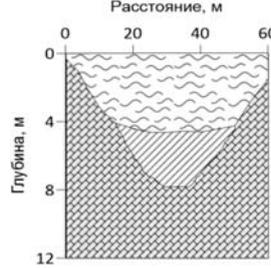
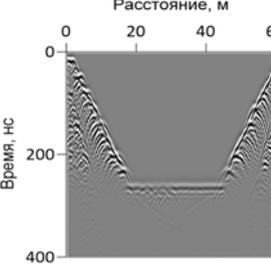
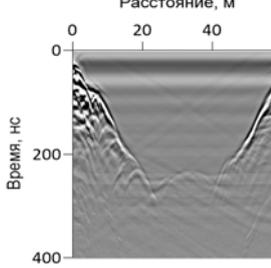
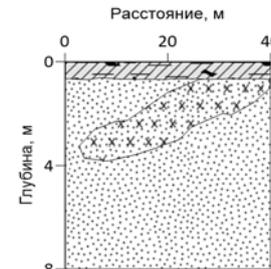
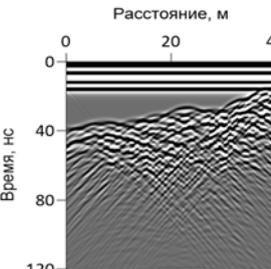
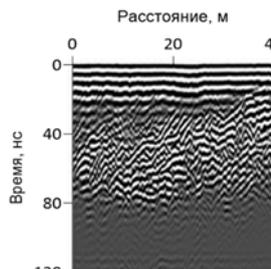
Построение георадиолокационных моделей разреза верхней части массива горных пород россыпных месторождений Умеренной зоны выполнено на основе анализа природно-климатических и горно-геологических условий россыпных месторождений золота р. Аллах-Юнь, р. Большой Куранах, руч. Муравьевский и данных комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии. Основные георадиолокационные модели массива пород россыпных месторождений Умеренной зоны Якутии представлены в таблице 2. Модель 1У представляет собой четырехслойную горизонтально-однородную среду рыхлых отложений: почвенно-растительный слой (в том числе торф), пески с гравием, золотосодержащие галечники с щебнем и алевритом. Модель 2У представляет собой четырехслойную среду, характерную для промерзшего дражного котлована: лед, вода, пески, коренные породы. Модель 3У описывает дражный котлован в летнее время, и состоит из трех слоев: воды, песков, коренных пород. Модель 4У – двухслойная среда: почвенно-растительный слой, мерзлые рыхлые отложения с включением слоя сильно-льדיстых пород.

Слоистая структура массива рыхлых отложений модель 1У (табл. 2, 1а) отображается на синтетической радарограмме протяженными осями синфазности отраженных волн (табл. 2, 1б). При однородных свойствах горных пород искривление формы осей синфазности связано только с рельефом соответствующих слоев. Исходными данными для этой модели послужили результаты геофизических исследований на месторождении россыпного золота ручья Муравьевский (табл. 2, 1в). Данные георадиолокации при интерпретации опирались на информацию по скважинам буровой линии Л44. В опорных точках, около скважин, выполнены параметрические зондирования по методу общей глубинной точки, что позволило рассчитать среднюю скорость электромагнитных волн в перекрывающей толще (торф и почвенно-растительный слой):  $V=0,113$  м/нс ( $\varepsilon'=7$ ). По составу пород определены значения УЭС ( $\rho$ ) для каждого слоя. До глубины 2 м прослежен почвенно-растительный слой с торфом ( $\varepsilon'=7$ ;  $\rho=5 \cdot 10^2$  Ом\*м). Под ним на глубине с 2 до 7 м – слой песка с гравием ( $\varepsilon'=9$ ;  $\rho=5 \cdot 10^2$  Ом\*м). Далее на глубине от 6-7 м и до 7-8 м золотосодержащий пласт галечников с щебнем ( $\varepsilon'=7$ ;  $\rho=2 \cdot 10^3$  Ом\*м), залегающий на коренных породах – алевритах ( $\varepsilon'=6$ ;  $\rho=2 \cdot 10^3$  Ом\*м). Все породы в разрезе находятся в талом состоянии.

На основе полученных данных построен геологический разрез (табл. 2, 1а), согласно которому проведено компьютерное моделирование и получена синтетическая радарограмма (табл. 2, 1б) для георадара с центральной частотой 250 МГц. Данные компьютерного моделирования и натурные данные георадиолокации имеют схожую волновую картину для границ слоев –

на натуральных данных больше различных отражений и волн дифракции, связанных с неоднородностью массива горных пород.

Таблица 2. Георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Умеренной климатической зоны

№	Назв.	Геоэлектрический разрез	Синтетическая радарограмма	Результат полевых ГРЛ зондирований
		а	б	в
1	1У			
2	2У			
3	3У			
4	4У			

 Торф  
( $\epsilon = 7, \rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Песок с гравием  
( $\epsilon = 9; \rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Галечники с щебнем  
( $\epsilon = 7, \rho = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Алевролит  
( $\epsilon = 6, \rho = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Лёд  
( $\epsilon = 3.2, \rho = 10^5 \text{ м} \cdot \text{м}$ )

 Песчано-галечные отложения  
( $\epsilon = 12; \rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Вода  
( $\epsilon = 81; \rho = 70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Глинистые сланцы  
( $\epsilon = 6, \rho = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Суглинки  
( $\epsilon = 25, \rho = 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Сильнольдистые пески  
( $\epsilon = 4, \rho = 3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

 Мелкозернистые пески  
( $\epsilon = 6, \rho = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ )

Вторая георадиолокационная модель в таблице 2 построена на основе анализа данных, полученных в зимнее время при изучении дражного котлована

на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь. Геологический разрез модели 2У включает: лед мощностью 0,8 м ( $\epsilon'=3,2$ ;  $\rho=10^5$  Ом\*м), толщу воды мощностью 3 м ( $\epsilon'=81$ ;  $\rho=10^2$  Ом\*м), золотосодержащие пески, представленные песчано-гравийно-галечными отложениями мощностью от 3 м ( $\epsilon'=12$ ;  $\rho=5*10^2$  Ом\*м), которые залегают на коренных породах – глинистых сланцах ( $\epsilon'=6$ ;  $\rho=10^3$  Ом\*м) (табл. 2, 2а). Моделирование волнового поля выполнено на частоте 250 МГц с базой между передающей и приемной антеннами 0,63 м (георадар «ОКО-2»).

На синтетической радарограмме в верхней части разреза прослеживаются оси синфазности зондирующих сигналов (табл. 2, 2б). Чуть ниже на них накладываются высокоамплитудные (контрастные) сигналы, отраженные от границы «лед–вода». От поверхности бортов дражного котлована образовались дифрагированные волны, они пересекаются в центре радарограммы и затрудняют ее интерпретацию в этой части. Регулярность сигналов и высокая контрастность на общем волновом поле позволяют отобразить границы кровли коренных пород лишь по краям котлована, в диапазоне 150-200 нс.

На натуральных данных с дражного котлована наблюдается аналогичная волновая картина, ее особенностью можно назвать кратные отражения от границы «лед-вода» (табл. 2, 2в), которые представлены контрастными протяженными осями синфазности. Как и на синтетической радарограмме, они маскируют отражения от кровли коренных пород по всей протяженности котлована. Борты и дно котлована отчетливо прослеживаются по волнам дифракции.

Георадиолокационная модель 3У в таблице 2 построена по данным, полученным при изучении дражного котлована на месторождении р. Б-Куранах в летний период (табл. 2, 3а). Волновое поле синтетической радарограммы модели 3У заметно выделяется своей однородностью по сравнению с другими моделями из-за большого дражного котлована, заполненного водой (табл. 2, 3б). Высокоамплитудные волны дифракции сформировали волновую картину бортов котлована, в которую входят также и переотражения сигналов. Дно котлована прослеживается по осям синфазности, образованным на границе «вода-суглинки». Сигналы на этой границе слабые из-за затухания электромагнитных волн в толще воды, а также от того, что суглинки пропитаны водой и имеют высокое значение вещественной части диэлектрической проницаемости. Выход коренных пород по дну котлована не просматривается на синтетической радарограмме, также как и на натуральных данных (табл. 2, 3в). Увеличение затухания электромагнитных волн с глубиной на натуральных данных заметнее по слабеющим отражениям от бортов котлована.

Модель 4У мерзлых рыхлых отложений с включениями слоя сильно-льדיстых пород построена по данным комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии. Модель не относится непосредственно к какому-либо месторождению, тем не менее она описывает встречающиеся в этом районе особые геологические условия (табл. 2, 4а).

Как видно на синтетической радарограмме модели, зондирующий сигнал и слой торфа (включая почвенно-растительный слой) ( $\epsilon'=7$ ;  $\rho=5 \cdot 10^2$  Ом\*м) образовали чередующуюся последовательность высокоамплитудных осей синфазности, которые не позволяют выявить верхнюю границу мелких и пылеватых песков ( $\epsilon'=6$ ;  $\rho=10^3$  Ом\*м) (табл. 2, 4б). Они имеют достаточно равномерное по амплитудам волновое поле, поэтому на их фоне хорошо прослеживаются сильно-льדיстые пески ( $\epsilon'=4$ ;  $\rho=3 \cdot 10^4$  Ом\*м), волновое поле которых сформировано большим количеством хаотично распределенных волн дифракции. Нижняя граница этой зоны не имеет четких границ и визуально определяется по снижению амплитуд, максимум которых сосредоточен в вершинах гипербол. Полученная синтетическая радарограмма хорошо описывает реальные данные с участка магистрального трубопровода в Южной Якутии (табл. 2, 4в). Можно отметить, что в волновом поле радарограммы натуральных данных, кроме волн дифракции, в зоне льдистости присутствуют протяженные оси синфазности, вероятно, образованные прожилками льда.

Таким образом, сформированы георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии, достоверно отражающие особенности строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны. С использованием разработанных моделей установлены и экспериментально подтверждены условия распространения георадиолокационных сигналов в массиве многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений в пределах 20 м, произведена оценка влияния геологических структурных неоднородностей и наличия геокриологических объектов на параметры регистрируемых сигналов и волновых полей.

### **Второе защищаемое положение**

*Разработанные алгоритмы, программно-методическое обеспечение обработки данных, интерпретационные признаки и критерии, учитывающие установленные закономерности изменения характеристик георадиолокационных сигналов и особенности формирования радарограмм при зондировании массивов мерзлых горных пород, обеспечивают корректную оценку горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны.*

В общем круге решаемых методом георадиолокации горно-геофизических задач прослеживаются две основные категории объектов исследования, по которым можно выделить две группы процедур обработки данных:

- изучение геометрии литологических границ разреза;
- выявление неоднородностей строения массива горных пород, связанных с нарушением и переувлажнением пород.

На первичной радарограмме отображается сложная структура волнового поля, включающая различные компоненты: прямые и повторные отражения, сигналы обратного рассеяния (дифракционные эффекты), отражения от воздушной среды, а также многочисленные типы помех.

Алгоритм обработки данных георадиолокационных исследований *горизонтально-слоистых разрезов* состоит из этапов первичной обработки и анализа радарограмм. При первичной обработке проводится редактирование полевых данных (удаление трасс-помех, прореживаются или интерполируются с учетом шага по профилю). Далее проводится коррекция амплитуд сигналов с целью выявления границ отражающих слоев. На этапе анализа радарограмм при наличии помех от сезонно-талого слоя (СТС) проводится вейвлет-преобразование сигналов. Затем следуют процедуры послойной обработки радарограммы горизонтально-слоистого разреза: выделение границ на радарограммах и расчет скорости сигналов в отдельных слоях для преобразования временной развертки радарограммы в масштаб глубин. Расчет скорости сигналов в слоях можно проводить сопоставлением времени задержки сигналов, отраженных от границ слоев, с данными бурения или с данными георадиолокационного зондирования по методике общей глубинной точки (ОГТ) с разнесением антенн или по отражениям от локальных неоднородностей (процедура «гипербола»).

Выявление интерпретационных признаков *зон неоднородностей* массива мерзлых горных пород слоистого строения производилось путем сопоставления результатов георадиолокации с данными бурения и комплексирования с другими геофизическими методами, анализа волновой картины, при котором рассматривались конфигурация, интенсивность, протяженность осей синфазности, кинематические и динамические характеристики сигналов. Проведенными исследованиями установлено, что основными аномалиями георадиолокационных разрезов, связанными с неоднородностями строения массива горных пород, являются (рисунок 1): а) «хаотичные» сигналы на участках трещиноватых коренных пород (нарушенных структур); б) скачкообразное изменение времени задержки сигналов, характерное для пустот; в) разрывы осей синфазности сигналов с изменением времени задержки сигналов в зонах просадочных деформаций.

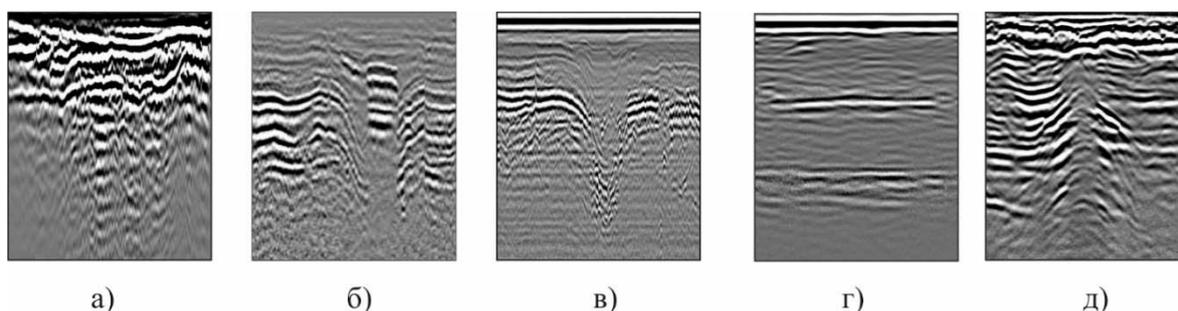


Рисунок 1. Примеры радарограмм участков неоднородностей геологического строения массива горных пород россыпных месторождений: а) трещиноватые коренные породы; б) карстовая полость; в) западение плотика; г) пластовый лед; д) повторно-жильный лед

Разработаны критерии распознавания наличия в массиве мерзлых горных пород подземных льдов. Расчетные георадиолокационные модели, результаты физического моделирования, натурные эксперименты и опыт

георадиолокационных зондирований на россыпных месторождениях Субарктической зоны показали, что для выявления подземного пластового льда (рисунок 1г) необходимо наличие следующих критериев: оси синфазности сигналов, расположенные одна под другой и противоположные по фазе сигналов; отношение амплитуд от границ льда ( $A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}}$ ) должно быть меньше  $0,95^{\Delta t}$ , где  $\Delta t$  – время задержки сигнала во льду; «изрезанность» Фурье-спектра сигналов. Для распознавания участка аномалии радарограммы как повторно-жильного льда (ПЖЛ) (рисунок 1д) дополнительно к признакам пластового льда необходимо выполнение следующего условия: наличие двух гиперболических осей синфазности, расположенных одна под другой (наличие двух непрерывных осей синфазности, расположенных одна под другой с гиперболическими «хвостами»).

На рисунке 2а представлена схема геологического разреза с включением подземного пластового льда в массиве мерзлых горных пород. Радарограммы этого разреза, полученные в результате физического моделирования в лабораторных условиях, приведены на рисунке 2б. На радарограмме модели пластового льда наблюдается изменение фазы сигнала, отраженного от нижней границы слоя льда, по сравнению с сигналом от его верхней границы. Графики Фурье-спектра трасс, полученные на участке с пластовым льдом, имеют «изрезанную» форму (рисунок 2в). Так как лед выступает в качестве гребенчатого режекторного фильтра  $k/\Delta t$  (где  $\Delta t$  – время двойного распространения волны в слое льда,  $k=0, 1, 2 \dots$ ). На рисунке 2г приведены частотные спектры трасс компьютерного моделирования георадиолокации подземного льда различной толщины. Расчеты проведены с помощью программы математического моделирования на основе ABCD-матриц для зондирующего сигнала с центральной частотой 400 МГц. При толщине пластового льда  $h=0,25\text{м}$  получен отраженный сигнал со спектром частот с  $k=3$ .

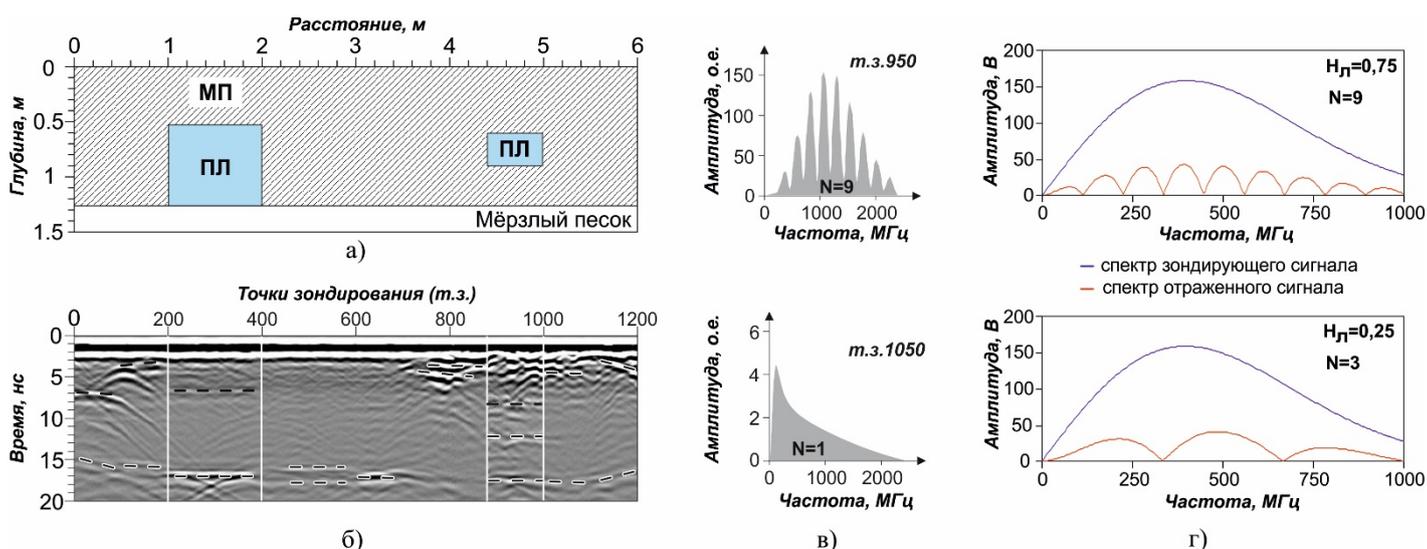


Рисунок 2. Результат георадиолокационного исследования массива мерзлых горных пород с включением пластового льда: а) схема геологического разреза; б) радарограммы физического моделирования; спектральные характеристики георадиолокационных трасс физического (в) и компьютерного (г) моделирования

Георадиолокационными признаками участков нарушений горизонтально-слоистого строения мерзлых рыхлых отложений, связанных с криогенными процессами, являются (рисунок 3): а) переотражения сигналов на границе переувлажнения СТС; б) высокое затухание амплитуды сигналов на участках повышенной влажности; в) высокие значения амплитуд сигналов в зонах пучения пород, которые образуют линзообразные оси синфазности; г) оси синфазности высокоамплитудных сигналов, характерные для границ сброса поверхностных вод или миграции надмерзлотных вод СТС; д) зона «хаотичных» сигналов, проявляющаяся деформацией поверхности, соответствует зоне суффозии, образующейся в результате выноса водным потоком части грунтов мелкой фракции в процессе их оттайки.

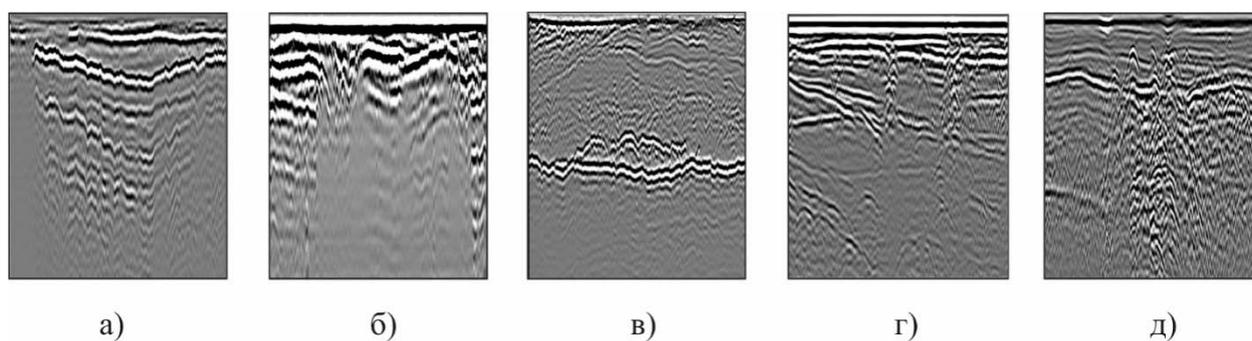


Рисунок 3. Примеры радарограмм участков развития криогенных процессов:  
 а) граница сезонно талого слоя;  
 б) зона водонасыщенности грунтов;  
 в) участок морозного пучения;  
 г) границы миграции поверхностных вод в толщу мерзлых пород;  
 д) зона суффозии

Для выявления описанных выше аномалий георадиолокационного разреза разработан алгоритм обработки данных, блок-схема которого представлена на рисунке 4. Для автоматизированной обработки георадиолокационных данных используются статистические методы. Появление сигналов с хаотичным распределением осей синфазности приводит к увеличению такой статистической характеристики, как дисперсия ( $DX$ ), которая определяет отклонение амплитуд сигналов от среднего ожидаемого значения. Анализ особенностей характера изменения значения дисперсии амплитуд сигналов по разрезу позволяет определять тип геологической неоднородности: относительно сглаженное изменение дисперсии определяет слоистую структуру, резкие изменения дисперсии соответствуют нарушенной структуре с многочисленными локальными неоднородностями.

При обработке данных, полученных в непрерывном режиме съемки, корреляция соседних сигналов, отраженных от одной геологической границы, составляет 0,95-0,99, что позволяет с высокой точностью проследивать отражающие границы даже в случаях резкого изменения положения на временной оси. В зонах с переотражениями сигналов в георадиолокационных трассах на

кратных временах задержки присутствуют сигналы одинаковой формы и с убывающими амплитудными значениями (закономерность убывания зависит от электрофизических свойств исследуемых горных пород).

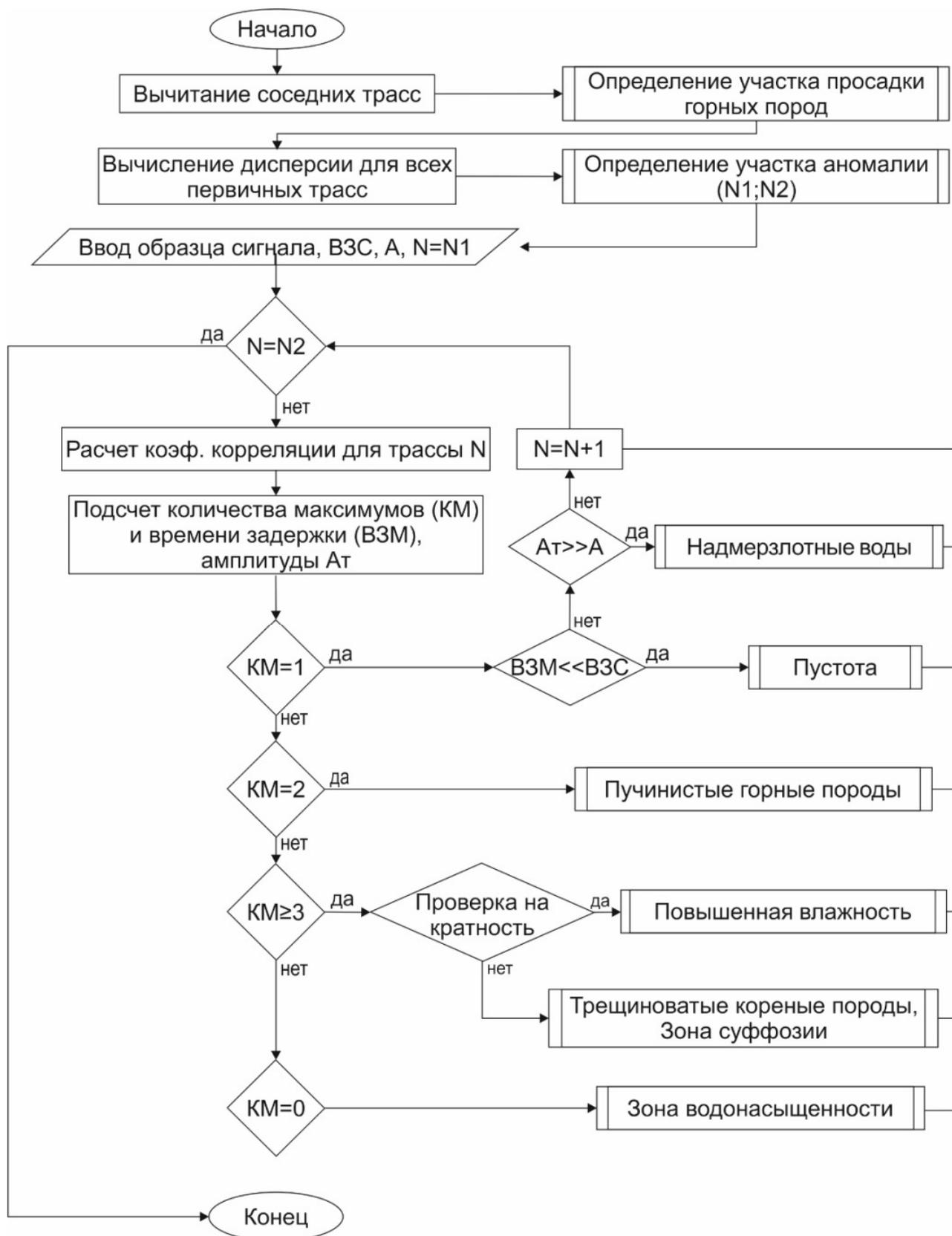


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма обработки данных для картирования неоднородностей массива горных пород

При обработке вводится образец сигнала с его временем задержки (ВЗС), далее анализируется обрабатываемая трасса (N), в которой прослеживается некоторое количество максимальных совпадений (KM). При этом производится поиск сигналов, максимально похожих на образец с регистрацией времени задержки для каждого максимума (ВЗМ) и амплитудного значения сигнала (At). Наличие остальных аномалий определяется на основе анализа параметра KM в соответствии с выявленными амплитудно-временными особенностями георадиолокационных сигналов. Автоматизированное выявление границ миграции надмерзлотных вод сезонно-талого слоя проводится на основе анализа динамических характеристик сигналов (At), с учетом, что они отличаются высокими значениями амплитуд.

На рисунке 5 представлены результаты апробации разработанного программного обеспечения при обработке данных геофизических работ на участке алмазонасной россыпи р. Маят.

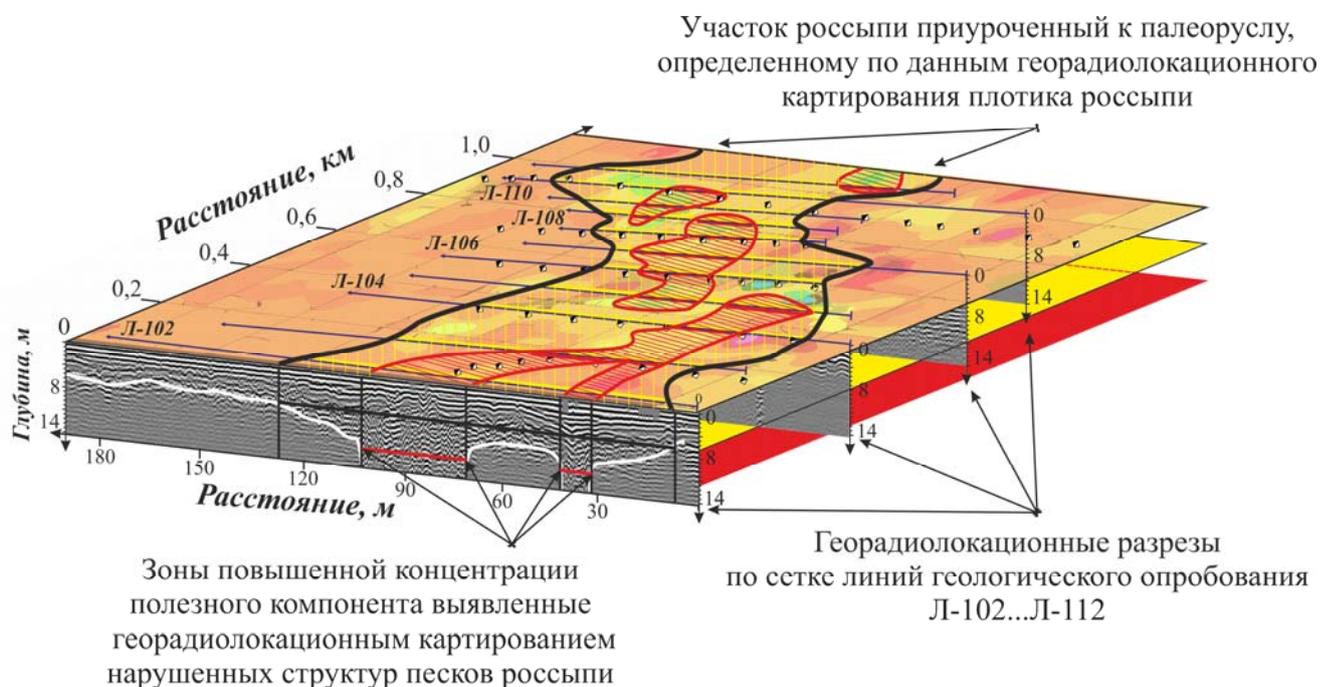


Рисунок 5. Результат картирования пространственного распределения полезного компонента на участке алмазонасной россыпи месторождения р. Маят

На георадиолокационных разрезах участка фиксируется отраженная граница на глубине порядка 3-5 м, интерпретируемая как подошва торфов. Очень хорошо прослеживаются оси синфазности отраженных волн в условиях сильного затухания, характеризующиеся как неоднородная структура ниже торфов, и граница коренных пород на глубине порядка 10-15 м. Уверенно прослеживаются контрастные отражения – предполагаемые участки аномальной зоны, выделяющиеся более высокоамплитудными значениями по сравнению с соседними участками профиля. Эти результаты дополнены исследованиями по площадной съемке параллельными профилями для трехмерной визуализации. По данным георадиолокационной съемки построена карта основной россыпи с

участками структурных разломов. Результаты обработки георадиолокационных исследований и геологического опробования нанесены на карту компонентного анализа данных магниторазведки и ДЭМП и комплексно проинтерпретированы с учетом всей геофизической и геологической информации. Результат приведенных исследований подтвержден отработкой россыпи по указанным контурам. Коэффициент корреляции результатов геофизических исследований и данных геологического опробования составил 0,83.

Таким образом, на основе результатов исследований закономерностей изменения характеристик георадиолокационных сигналов и особенностей формирования радарограмм при зондировании массива мерзлых горных пород разработаны интерпретационные признаки и критерии распознавания горно-геологических, геокриологических условий месторождений криолитозоны по данным георадиолокации. Результаты апробации разработанных алгоритмов и программного обеспечения обработки данных георадиолокации при комплексных геофизических работах на россыпных месторождениях криолитозоны показали возможность и высокую эффективность их применения для картирования границ слоев и структурных неоднородностей массива горных пород.

### **Третье защищаемое положение**

*Методика георадиолокационного мониторинга, основанная на применении установленной эмпирической связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности горных пород ( $7\% < W < 25\%$ ), учитывающей криогенное состояние и вещественный состав исследуемых дисперсных горных пород, позволяет оценить их влажность по данным разносезонных георадиолокационных измерений.*

Одним из направлений обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации объектов горной промышленности в криолитозоне является совершенствование существующих методов обследования строения и состояния горных пород бортов карьеров, кровли горных выработок и грунтов оснований инженерных сооружений. Как известно, физико-механические свойства мерзлых дисперсных горных пород зависят от их влажности (льдистости) и температуры. При разовых измерениях их значений в отдельных точках могут быть пропущены или не обнаружены зоны дренирования и застоя воды, деградационные процессы в дамбах, бортах и кровле горных выработок. Наблюдения методом георадиолокации за изменением влажности горных пород позволяют получать непрерывные данные на протяженных участках и могут, в отдельных случаях, существенно уточнить их устойчивость и криогенное состояние.

С целью разработки методики оценки влажности горных пород методом георадиолокации проведены исследования закономерности изменения скорости распространения электромагнитных волн в мерзлых породах при их оттайке. Лабораторные зондирования проведены георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 1200 МГц на образцах дисперсных пород, характерных для четвертичных отложений Центральной Якутии. Образцы представлены песками

различного состава и крупности: первый образец – среднезернистым песком, добываемым в русле р. Лена (далее «кварцевый песок»), второй образец – мелкозернистым песком с примесью глинистых частиц (далее «горный песок»). В процессе эксперимента проводились увлажнение, заморозка и последующая оттайка образцов горных пород.

По результатам георадиолокационных зондирований образцов с различной влажностью (3-22%) в процессе их оттайки рассчитаны скорость распространения электромагнитной волны в породах (рисунок 6) и ее относительное изменение  $N_V$  в их талом и мерзлом состоянии по выражению:

$$N_V = \frac{(V_m - V_m)}{V_m} * 100\%,$$

где  $V_m$  – скорость, определенная в период полного промерзания (0,150 м/нс);  $V_m$  – скорость распространения электромагнитных волн в период оттайки пород.

По полученным данным установлено, что значения  $N_V$  для всех исследуемых горных пород с относительным отклонением 4,3% могут быть аппроксимированы линейной формулой:

$$N_V = 1,55W + c,$$

где  $W$  – влажность,  $c$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава горной породы. По данным лабораторного эксперимента для горного песка коэффициент  $c$  определен значением 0,3, а для кварцевого – 11.

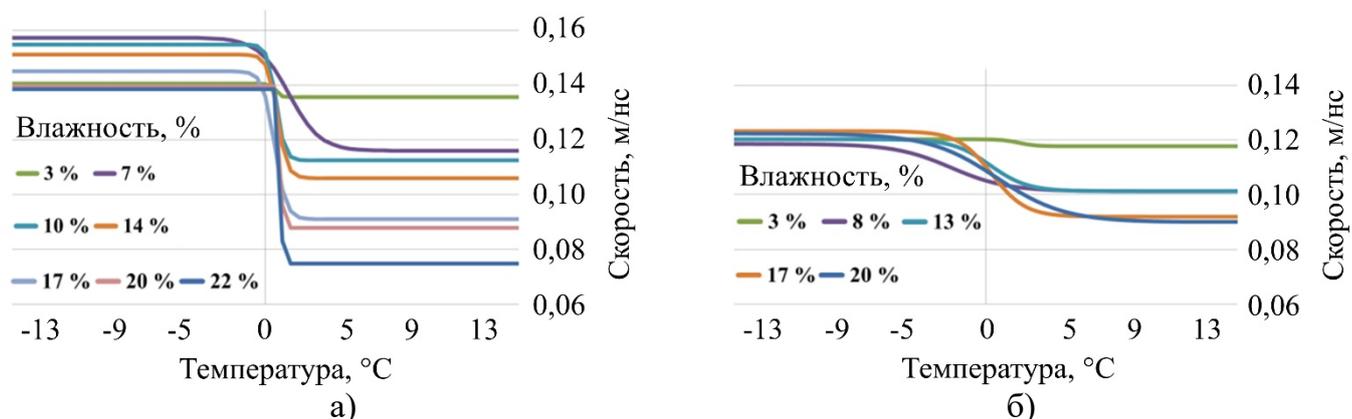


Рисунок 6. Зависимости скорости распространения ( $V$ , м/нс) георадиолокационных сигналов от влажности ( $W$ , %) и температуры ( $T$ , °C) горных пород при их оттайке: а) кварцевый песок; б) горный песок

Выполнены экспериментальные исследования по апробации данной зависимости в натуральных условиях на двух объектах: второй террасе долины Туймаада и массиве вскрышных пород Кангаласского угольного разреза (рисунок 7). Образцы второй террасы долины Туймаада получены вдоль Федеральной автомобильной дороги «Виллой» по 6 скважинам. В результате сопоставления данных теоретических расчетов и экспериментальных работ установлено, что коэффициент  $c$ , характеризующий горные породы, которые слагают исследуемый участок, равен 2,8.

Данные георадиолокации и образцы горных пород на участке угольного разреза «Кангаласский», расположенного в 45 км к северу от г. Якутска, получены в летний период, с июля по август. Измерения выполнены методикой профилирования антенным блоком АБ-400 по вскрышным породам угольного разреза. Контрольные скважины для определения влажности пробурены в трех точках до глубины 1,8 м, в начале, середине и конце георадиолокационного профиля. Образцы были взяты на глубинах 0,5 м, 1 м, 1,5 м и 1,8 м. По ним в лаборатории определены весовые влажности каждой пробы, а затем средние значения влажностей ( $W_{cp}$ ) в каждой скважине. После заморозки образцов горных пород этого участка в морозильной камере определена  $V_M = 0,120$  м/нс и получен коэффициент  $c = 6,4$ .

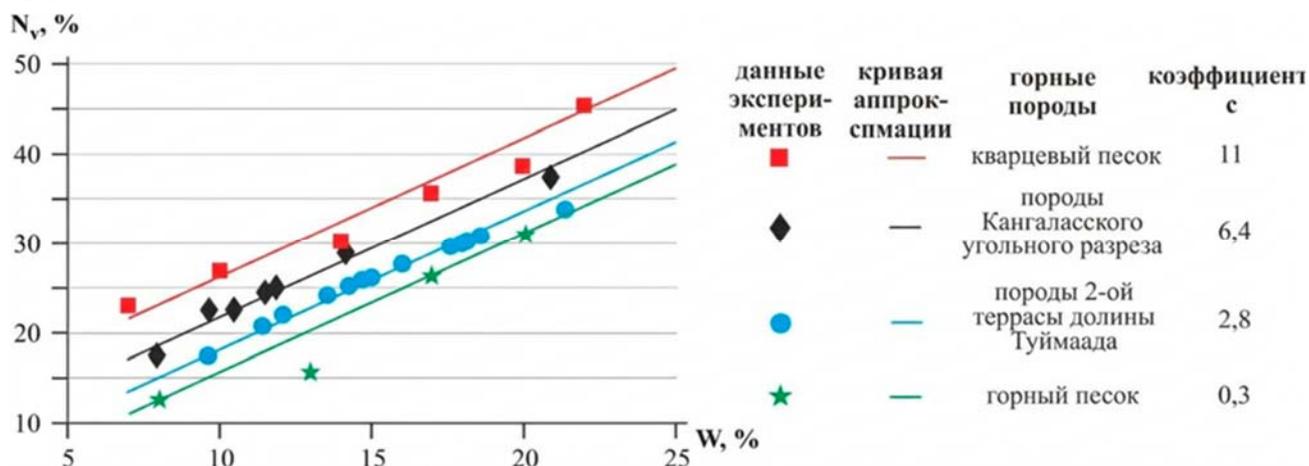


Рисунок 7. Зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны ( $N_v$ ) от вещественного состава и влажности ( $W$ ) горных пород

Результаты исследований показали, что при влажности пород  $W \geq 7\%$  значения скорости ( $V$ , м/нс) при полной заморозке и оттайке различаются на 10–46%. Этого достаточно для определения изменения влажности в пределах деятельного слоя по времени задержки сигналов, полученных по результатам разносезонных (в мерзлом и талом состоянии) георадиолокационных измерений.

В результате выполненных исследований предложен способ оценки влажности дисперсных горных пород по эмпирической формуле, основанной на определении относительного изменения времени задержки ( $N_t$ ) георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в талом и мерзлом состоянии, по формуле:

$$W = 0,65N_t - a,$$

где  $W$  – влажность;  $a$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава исследуемых горных пород;  $N_t$  – относительное изменение времени задержки сигналов, которое определяется из выражения:

$$N_t = \frac{(t_T - t_M)}{t_T} 100\%,$$

где  $t_M$  – время задержки сигналов для пород в мерзлом состоянии;  $t_T$  – время задержки сигналов для пород в талом состоянии.

Суть способа сводится к тому, что скорость распространения электромагнитных волн имеет свой максимум при полном промерзании горных пород. При этом вещественная часть диэлектрической проницаемости мерзлых

рыхлых отложений Центральной Якутии принимает минимальное значение по всей толще пород и находится в пределах 4–9. Такое состояние отложений условно можно принять как не содержащее влаги. В тот момент, когда породы начинают оттаивать, появляется вода – время задержки сигналов увеличивается. Следовательно, используя разницу между временем задержки сигналов в породах в талом и мерзлом состоянии, можно оценить их влажность. Применительно к данному способу разработана методика оценки средней весовой влажности рыхлых осадочных горных пород в диапазоне  $7\% < W < 25\%$  методом георадиолокации. Пределы значений определяемой влажности установлены при анализе лабораторных данных.

Методика оценки влажности дисперсных горных пород включает следующие этапы:

- определение информации об «опорной» границе в пределах деятельного слоя, относительно которой будет рассчитываться влажность пород;
- проведение георадиолокационных измерений массива горных пород в мерзлом и талом состоянии;
- расчет относительного изменения времени задержки георадиолокационных сигналов  $N_t$ ;
- контрольное бурение со взятием проб влажности для определения коэффициента  $a$ ;
- расчет средней весовой влажности пород по формуле  $W = 0,65N_t - a$  с учетом их вещественного состава по коэффициенту  $a$ ;
- визуализация результатов расчета влажности исследуемого слоя массива пород по профилю исследования.

Для определения влажности методика предполагает бурение в одной контрольной точке с целью последующего расчета коэффициента  $a$ . Этот пункт позволяет существенно повысить достоверность данных. Однако при невозможности бурения коэффициент  $a$  определяется в зависимости от вещественного состава пород, численно, из диапазона, который определен экспериментально (от 0,1 до 8). Значения  $a$  определены при проведении физического моделирования: горный песок ( $a=0,1$ ) и кварцевый песок ( $a=6,8$ ), а также при апробации методики на двух участках (вторая терраса долины Туймаада и массив вскрышных пород Кангаласского угольного разреза) со смешанным составом ( $a=1,1$  и  $a=7,2$ ). В связи с этим бурение остается важным этапом ведения работ при определении влажности по предложенной методике на новых участках.

Апробация методики оценки влажности дисперсных горных пород методом георадиолокации и ее программно-методического обеспечения проведена в натуральных условиях на дамбе угольного разреза «Кангаласский». Дамба сооружена на участке ведения вскрышных работ и защищает карьер от поверхностных вод. Мониторинговые георадиолокационные измерения выполнены георадаром с центральной частотой 400 МГц в апреле, июле и сентябре (рисунок 8). Контрольные скважины пробурены на отметках 76 и 98 м

по профилю до глубины 3,4 м (рисунок 8а). Образцы горных пород из скважин взяты через каждые 0,3 м по глубине и для каждого из них в лаборатории определены весовые влажности, а затем рассчитано среднее значение ( $W_{cp}$ ).

Для оценки влажности горных пород в автоматическом режиме в базу данных загружались георадиолокационные разрезы весенних (полное промерзание) и летних (частичное оттаивание деятельного слоя) измерений с опорной геологической границей в виде осей синфазности сигналов, отраженных от границы основания дамбы (рисунок 8б).

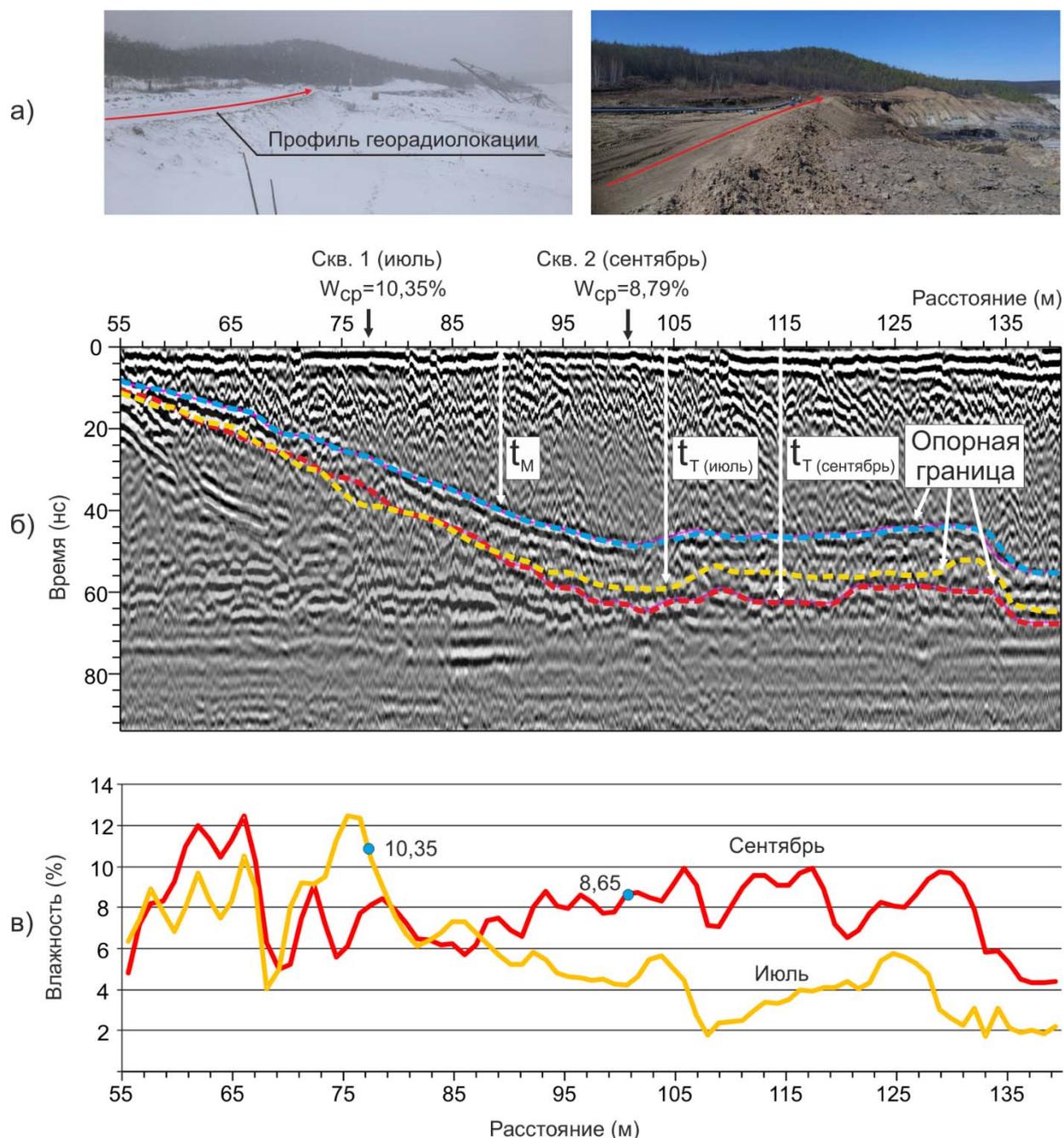


Рисунок 8. Пример оценки влажности грунтов основания водозащитной дамбы: а) фото участка георадиолокационных измерений в апреле и сентябре; б) георадиолокационный разрез, на котором представлены результаты выделения опорной границы в мерзлом ( $t_M$ ) и талом ( $t_T$ ) состоянии массива горных пород; в) результаты расчета средней весовой влажности ( $W_{cp}$ ,%) вдоль профиля георадиолокационного разреза исследуемого слоя горных пород

Для определения времени задержки ( $t_m$ ) и ( $t_T$ ) использована специальная процедура обработки, основанная на расчете коэффициента корреляции амплитудно-временных характеристик сигналов в соседних точках зондирования профиля. Выбранные времена задержки сохранены в два файла (для весенних и летних данных). По сопоставлению данных бурения и георадиолокации определено значение коэффициента  $a=7,2$ .

Далее по методике произведен расчет влажности горных пород:  $W=0,65 \cdot N_t - a$ . Построены графики влажности по профилю, полученные по данным в июле и в сентябре (рисунок 8в). В результате средняя весовая влажность в точке бурения Скв.2 по данным лабораторных исследований составила 8,79%, по данным георадиолокации 8,65%.

Таким образом, разработанная модель связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности дисперсных горных пород, учитывающая криогенное состояние и вещественный состав горных пород, стала основой для создания методики георадиолокационной оценки влажности горных пород по данным разносезонных георадиолокационных измерений в пределах деятельного слоя, которая успешно применяется при инженерно-геологических изысканиях в Центральной Якутии.

#### **Четвертое защищаемое положение**

*Технология наземных и дистанционных георадиолокационных измерений для решения задач исследования горно-геологических условий массивов многолетнемерзлых горных пород позволяет:*

- прослеживать границы продуктивных горизонтов россыпных месторождений криолитозоны;*
- определять местоположение структурных особенностей строения массива горных пород;*
- картировать пространственное распределение геокриологических объектов разрабатываемого массива горных пород.*

На основе анализа параметров георадиолокации и возможностей современной георадиолокационной аппаратуры «ОКО» (ООО «ЛогиС») обоснована технология проведения полевых измерений, обеспечивающая глубинность и детальность исследований, достаточные для изучения горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны. Техника ведения полевых георадиолокационных работ на действующих месторождениях включает профилирование, дискретные и параметрические зондирования в отдельных точках на линии профилей. Георадиолокация осуществляется по намеченным профилям с установкой параметров съемки, соответствующих конкретным условиям и поставленным задачам. На участках открытых горных работ геофизики сталкиваются с трудностями по перемещению антенного блока георадара вдоль профиля. Неравномерное перемещение георадара приводит к искажению данных непрерывной съемки. На неровных участках и местах скопления валунов не обеспечивается оптимальный режим излучения из-за

потери контакта антенн с поверхностью. Для получения корректных результатов георадиолокация выполняется в дискретном режиме или параметрическими измерениями. В условиях ограниченного пространства и пересеченной местности используется угловое георадиолокационное сканирование, выдающее радарограмму, аналогичную реализации по методике профилирования, но из одной точки наблюдений.

Реализация разработанной технологии полевых георадиолокационных измерений проведена при выполнении геофизических работ на месторождениях р. Маят, р. Молодо, р. Далдын, руч. Муравьевский, р. Аллах-Юнь, р. Б.Куранах и т.д., а также при исследовании криогенного состояния грунтов оснований инженерно-технических сооружений Якутии.

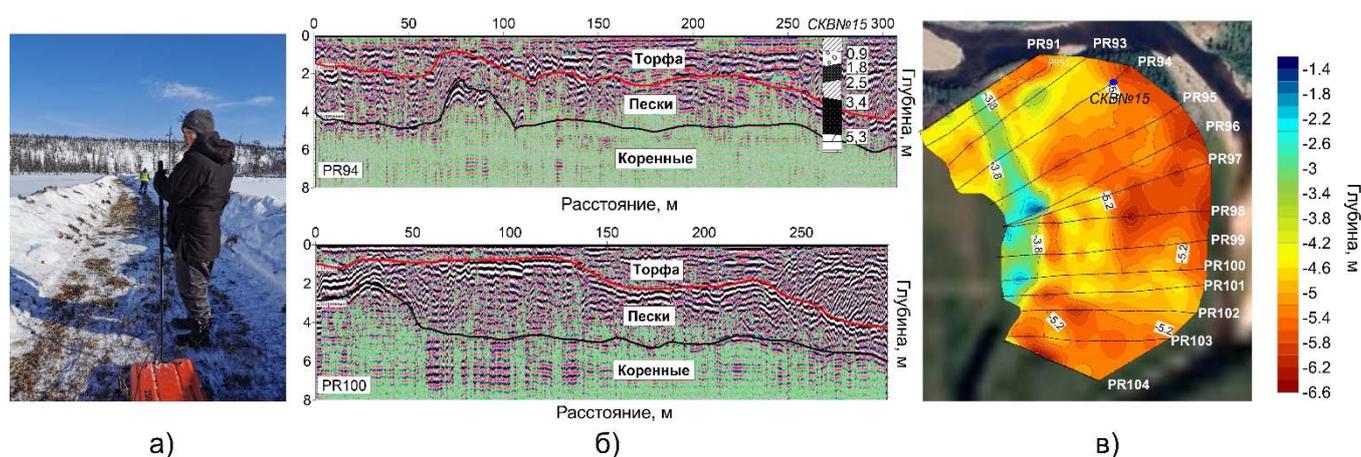
#### *Прослеживание границы продуктивных горизонтов*

На рисунке 9 представлен пример прослеживания кровли коренных пород и границы «торфа (вскрышные породы) – пески (продуктивный пласт)» на одном из участков россыпного месторождения алмазов на р. Далдын, левого притока р. Молодо (Якутия). Основные запасы алмазов сосредоточены в отложениях русла, кос и низкой поймы. На отдельных участках долины р. Далдын рассматриваемая россыпь сложена русловыми отложениями, и ее ширина в этом случае определяется шириной самой реки, равной 20-30 м. Однако в тех случаях, где наблюдается весь комплекс отложений, ширина русловой россыпи увеличивается, достигая нередко 150 м. Минимальная мощность руслового аллювия – 0,2-0,3 м, максимальная – 6-7 м. В нижнем течении средняя мощность равна 2,6 м, в верхнем течении – 2,2 м.

Для исследования использованы георадары «ОКО-3» с антенными блоками с центральной частотой 250 МГц и 100 МГц. Полевые измерения на участке выполнены с расстоянием между профилями от 30 до 50 м. Для исключения влияния снежного покрова на результаты георадиолокационных измерений проведена очистка снега по маршруту профилей. Привязка результатов георадиолокации к местности осуществлена с использованием датчика перемещения с колесом ДП-32 и спутникового GNSS приемника.

Для выделения полезных отражений на радарограммах и привязки их к литологическим разностям использованы данные бурения, проведенного после георадиолокационных измерений. При обработке данных и анализе радарограмм применены разработанные алгоритмы и программно-методическое обеспечение, позволившие проследить кровлю коренных пород и границу «торфа-пески». По данным бурения на участках работ установлено среднее значение диэлектрической проницаемости – основной электрофизический параметр, определяющий масштаб глубин георадиолокационных разрезов, который составил по разрезу  $\epsilon'=5$ . На основе этих данных в программе Surfer построена карта глубины коренных пород и изомощности песков геостатистическим методом Kriging. Например, по участку № 5 (рисунок 9) максимальная глубина коренных пород составила 6,5 м, минимальная – 1,8 м при средней по участку

4,8 м. Максимальная мощность песков составила 4,8 м, минимальная – 0,7 м при средней по участку 2,96 м.



а) б) в)  
Рисунок 9. Пример картирования кровли коренных пород на участке россыпного месторождения алмазов р. Далдын:

а) полевые измерения георадаром «ОКО-3» с АБ-250;

б) радарограммы профилей PR94 и PR100; в) карта глубины коренных пород участка № 5

### *Определение местоположения структурных особенностей строения массива горных пород*

На основе построенных георадиолокационных моделей разработана методика георадиолокационного картирования дражных полигонов россыпных месторождений криолитозоны, обеспечивающая возможность трехмерного отображения геологического строения россыпи с выделением его структурных особенностей (мощности песков, гипсометрии и нарушенности плотика) с GPS-привязкой их местоположения, что имеет важное значение для оперативного контроля полноты и качества выемки золотоносных песков, принятия соответствующих технологических решений. Для решения проблемы навигации в условиях отсутствия ориентиров на водной поверхности котлована предложено загружать план профилей в GPS-приемник и корректировать курс плавсредства в режиме реального времени. Для последующих трехмерных построений обязательным условием является синхронизация георадиолокационных данных с GPS-координатами, обеспечивающим точную привязку каждого сигнала (трассы).

На рисунке 10 представлены результаты георадиолокации, выполненные на участке месторождения золота р. Б. Куранах. В средней части котлована зафиксирован выход коренных пород, частично скрытых под водой. Из-за присутствия скального выхода и стоящего поблизости земснаряда небольшая зона осталась неисследованной георадиолокацией.

Съемки проведены георадаром «ОКО-2» (АБДЛ-50) по 20 профилям. Обработка данных позволила установить контур котлована с глубинами 1,5-13,5 м, и построить 3D-визуализацию геологического строения россыпи, выявив обнажения коренных пород на глубинах 4,5-7,5 м. На отдельных разрезах выход

скальных пород связан со скоплением крупных обломков. По георадиолокационным разрезам определены геометрические параметры котлована, необходимые для его дальнейшей отработки.

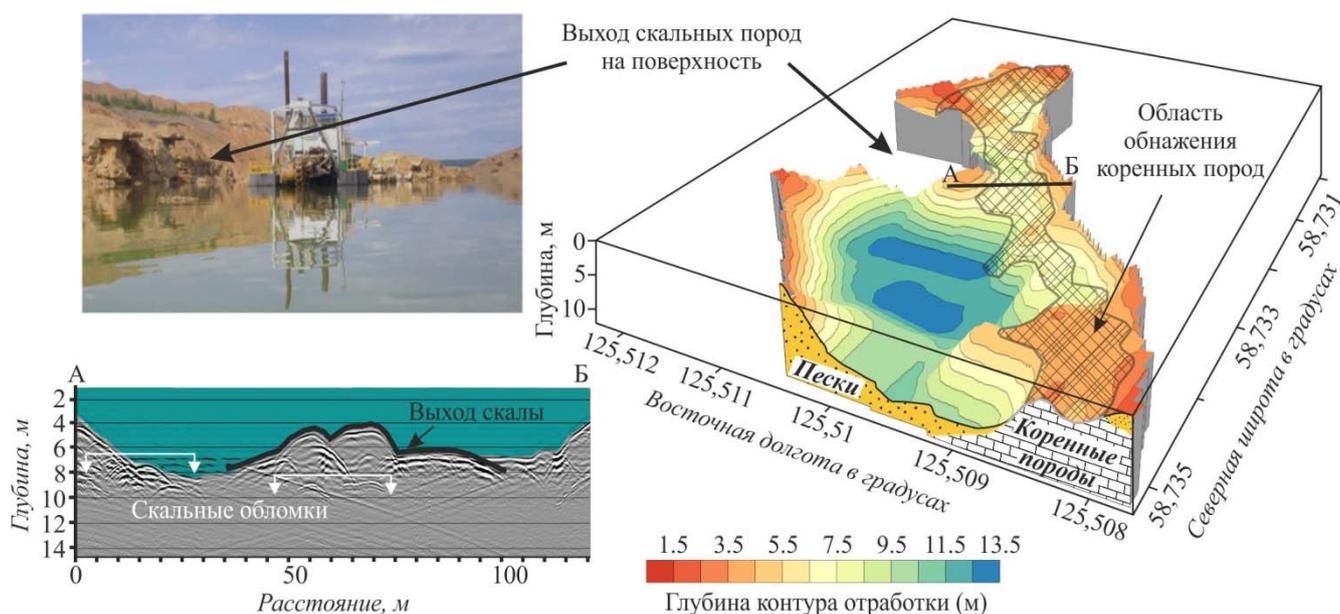
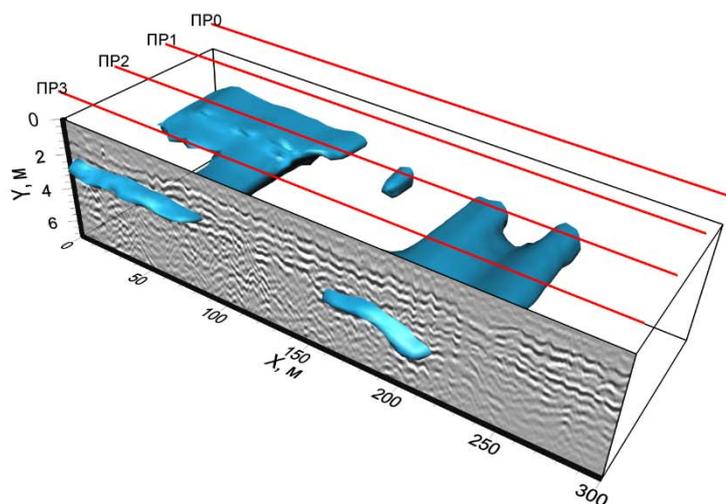


Рисунок 10. 3D-карта конфигурации участка дражного полигона месторождения золота р. Б. Куранах с выделением области обнажения коренных пород под слоем воды

### *Картирование пространственного распределения геокриологических объектов в массиве горных пород*

Опыт буровзрывных работ для подготовки торфов к выемке на россыпных месторождениях Субарктической зоны показал, что наличие в составе вскрышных пород подземных льдов существенно снижает эффективность взрыва, приводит к снижению качества дробления вплоть до выхода негабаритов.

Георадиолокационные исследования на участке месторождения р. Далдын проведены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250. В результате площадных исследований вскрышных пород и анализа полученных данных георадиолокации выявлено наличие подземных льдов, которые залегают на коренных породах, в толще песков и перекрыты торфами (рисунок 11а). Георадиолокационные сигналы, позволившие выявить лед, образуют сплошную высокоамплитудную отражающую границу от кровли льда – непрерывную ось синфазности. На радарограмме по профилю ПРЗ отражения ото льдов прослеживаются на отрезках 3-85 и 160-215 м на глубине 2 и 3 м. Их подошва прослеживается по схожим характеристикам, мощность льдов 1,3-1,5 м. На волновом поле радарограммы толща пластового льда практически однородна и образована контрастными протяженными осями синфазности. Рыхлые отложения (торфа, пески) и коренные породы представляются на радарограмме прерывистыми осями синфазности с большим количеством гипербола от гальки и обломочных коренных пород соответственно. Результаты интерпретации радарограммы подтверждаются визуальным наблюдением борта вскрышного блока (рисунок 11б).



а)



б)

Рисунок 11. Результат экспериментальных георадиолокационных исследований пластового льда на россыпном месторождении (АО «Алмазы Анабара»):  
а) 3D карта по данным георадиолокации; б) фото борта вскрышного блока

На рисунке 12 представлен пример выделения ПЖЛ по данным георадиолокации на участке автозимника «Молодо-Джарджан» (Анабарский район, Якутия). Данный участок характеризуется просадками грунтов, вследствие оттайки подземных льдов, что приводит к аварийным ситуациям при движении автотранспорта и нарушению бесперебойного снабжения горнодобывающих предприятий. Обследование участка протяженностью 8 км проводилось с использованием вездехода «Север-Трак» и георадара «ОКО-2». Антенный блок АБ - 250 с датчиком перемещения ДП-32 был присоединен к транспортному средству при помощи жесткой сцепки. На радарограмме по дифрагированным волнам-гиперболам определены ПЖЛ, которые обозначены синими контурами. Индикатором клиновидной формы ПЖЛ являются изогнутые вверх оси синфазности сигналов, отраженных от границы слоев вмещающего массива горных пород.

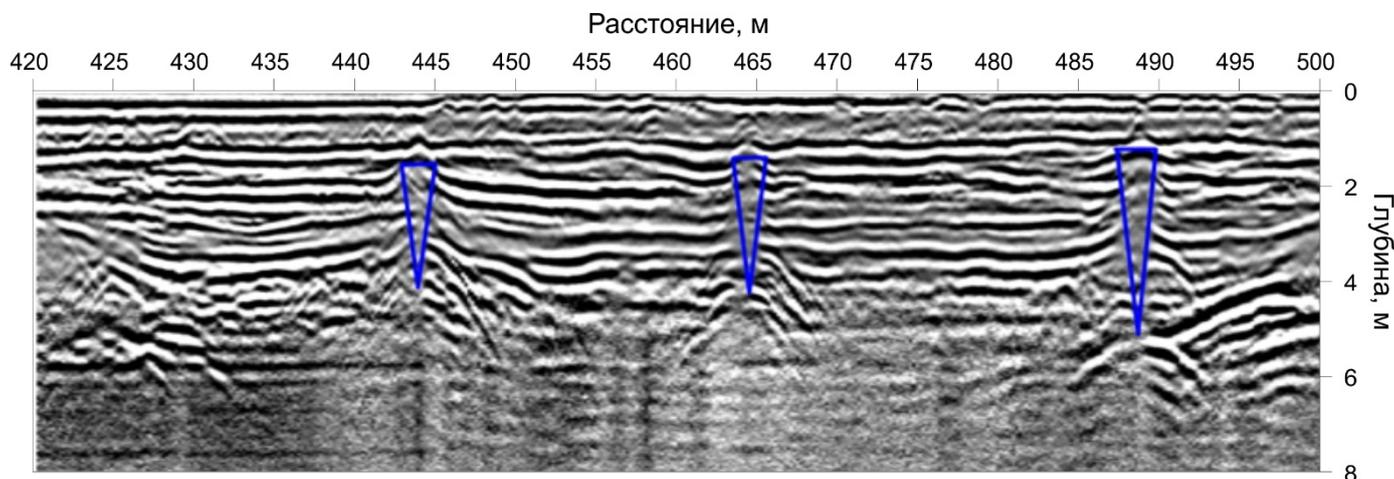


Рисунок 12. Пример радарограммы с выделенными ПЖЛ

## Пятое защищаемое положение

*Технология выявления участков развития криогенных процессов в массивах горных пород, основанная на анализе волновых картин радарограмм режимных георадиолокационных наблюдений, позволяет проводить мониторинг криогенного состояния грунтов оснований горнотехнических сооружений, эксплуатируемых при освоении россыпных месторождений.*

При освоении месторождений, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород, возникает необходимость детального изучения геокриологической обстановки. Под воздействием проводимых горных работ происходят естественные и техногенные изменения всего комплекса природных условий, которые сопровождаются активизацией опасных криогенных процессов. Наблюдения методом георадиолокации за изменением криогенного состояния среды позволяют получать непрерывные данные на протяженных участках, которые могут существенно повысить качество результатов инженерно-геологических исследований.

Экспериментальными георадиолокационными исследованиями выявлен эффект накопления заряда на контрастных границах раздела сред, который позволяет выделять в георадиолокационном разрезе зоны повышенной (талые породы) и пониженной проводимости (мерзлые породы), а следовательно, проводить качественную и количественную оценку состояния исследуемой среды. На рисунке 13 по форме графика сигнала, не характерного для диэлектрических сред, выделена граница раздела двух пластов – верхнего проводящего и нижнего – слабопроводящего.

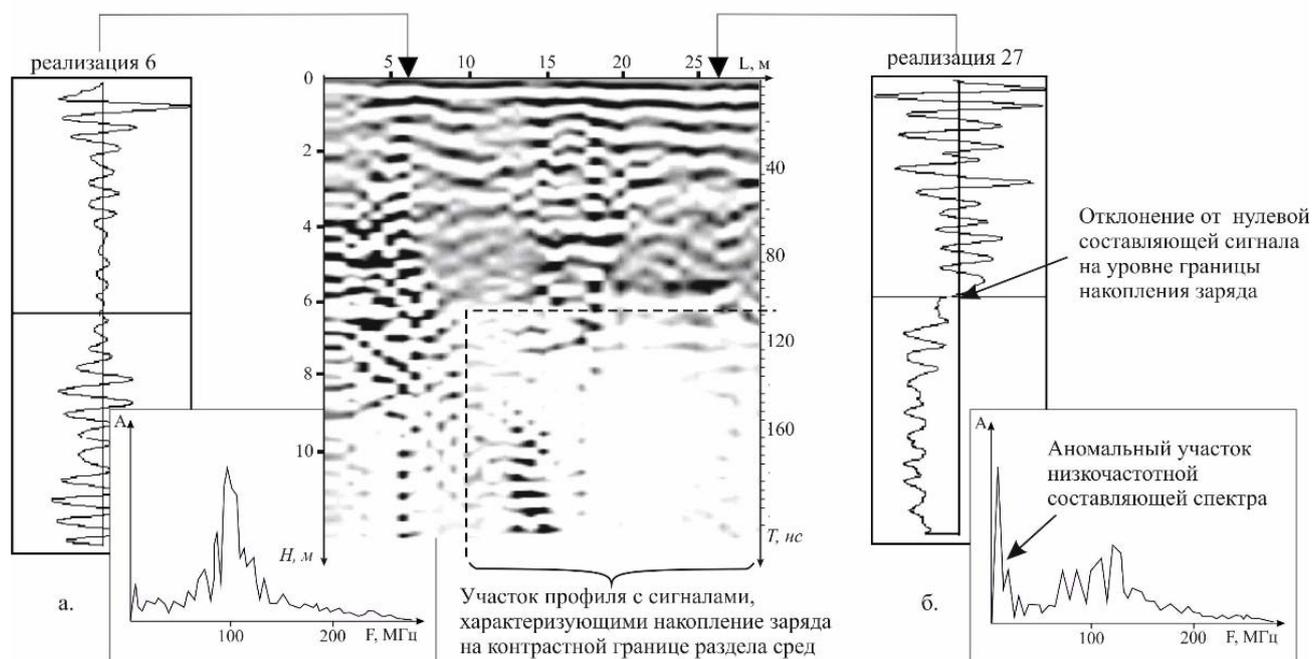


Рисунок 13. Результаты георадиолокации по профилю с контрастной границей раздела сред с эффектом накопления заряда

Необычность формы графика сигнала 27 заключается в смещении амплитудной оси колебательного процесса влево по рисунку. В точке сигнала 6 подобная граница не выделяется, смещение отсутствует, а рассматриваемая часть разреза, судя по затуханию поля (переходный процесс), относительно однородна и электропроводна. В точке трассы 27 ниже отмеченной границы выделена слабоэлектропроводная (диэлектрическая) среда, соответствующая мерзлым пескам (затухающий процесс почти не заметен). Результаты физического моделирования оттайки дисперсных горных пород показали, что одним из георадиолокационных признаков для мониторинга оттайки горных пород могут выступать спектральные характеристики сигналов. Так, смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов в низкую область характеризует увеличение содержания незамерзшей воды в породе, то есть процесс оттайки.

Согласно разработанной методике мониторинга криогенных процессов на начальном этапе производится привязка профилей, проводятся рекогносцировочные георадиолокационные измерения на исследуемом участке. По результатам измерений производится настройка параметров сканирования (развертка, накопление сигналов, шаг между трассами и режимы измерений). Затем выполняются полевые работы методом георадиолокации в вариантах зондирования или профилирования для получения исходного разреза. Далее реализуются режимные наблюдения на участке негативных криогенных процессов для получения контрольных разрезов. В ходе мониторинговых исследований должны соблюдаться повторяемость параметров сканирования (неизменные условия генерации и регистрации сигналов) и периодичность измерений. Объемы, периодичность, длительность измерений определяются в соответствии с поставленными целями и задачами мониторинга (зависят от геокриологических объектов, процессов и явлений). Особо можно выделить разносезонные измерения, когда исследования проводятся в два этапа. Первый этап – в период максимального промерзания грунтов (февраль-март) и второй этап – в период максимальной оттайки грунтов (сентябрь-октябрь). Также для мониторинга контролируемых параметров георадиолокации необходимо проведение ежегодных измерений.

Для реализации методики мониторинга криогенных процессов разработан программно-методический комплекс (рисунок 14), интегрирующий и обеспечивающий взаимодействие программного обеспечения для обработки данных георадиолокационных измерений, базы данных (БД) и геоинформационной системы (ГИС). Комплекс включает БД со специализированной структурой, позволяющей хранить данные измерений, GPS-привязки, фото, видео, а также данные бурения скважин, и ГИС с разработанными модулями импорта, обработки, анализа и визуализации данных георадиолокации. На рисунке 15 представлен результат апробации разработанного программно-методического комплекса при выявлении участков криогенных процессов в грунтах оснований водозащитной дамбы по данным георадиолокации. По профилю исследований выделены локальные неоднородности,

интерпретируемые в соответствии с разработанными признаками как участки с пучением пород – I, повышенной влажности – II, зон суффозии – III, которые отображены в геоинформационной системе.

### Программно-методический комплекс



Рисунок 14. Основные элементы программно-методического комплекса и направления передачи информации между ними

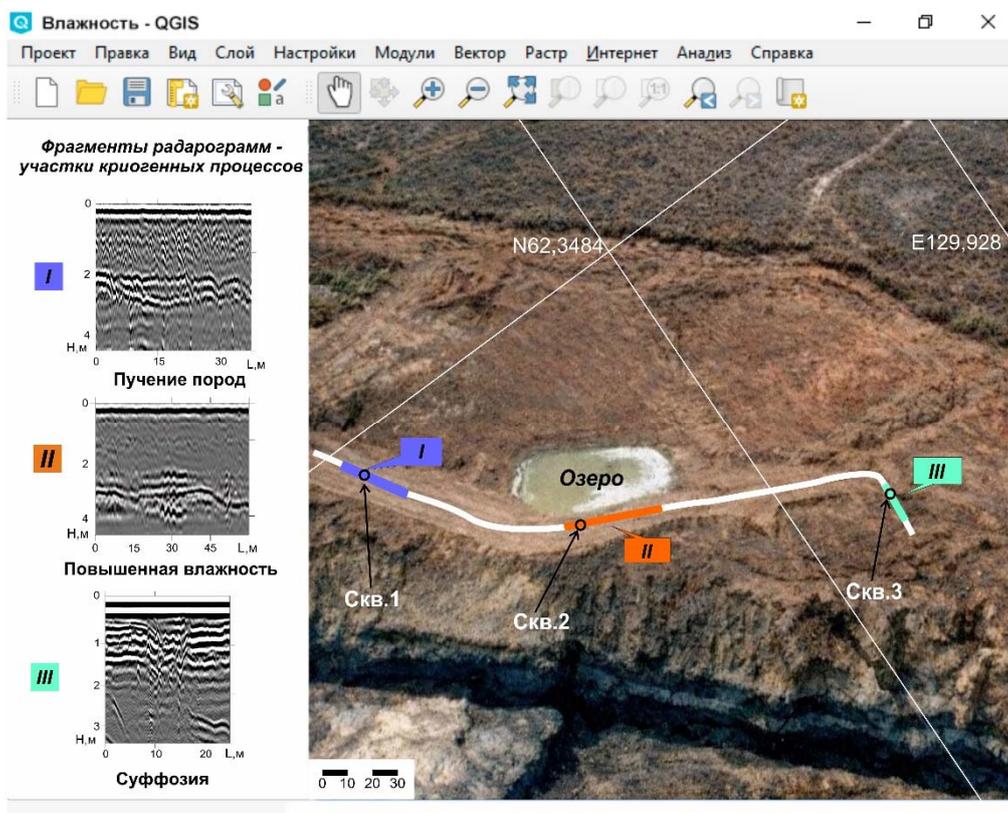


Рисунок 15. Отображение участков криогенных процессов по георадиолокационному профилю дамбы в геоинформационной системе

На рисунке 16 представлен пример мониторинга развития таликовой зоны по изменению структуры радарограмм на участке «Виллойский тракт» с 2012 г. по 2019 г. Данные георадиолокации по годам получены в холодный период года, при максимальном промерзании грунтов. В ходе мониторинговых исследований согласно вышеприведенной методике соблюдались повторяемость параметров зондирования и периодичность измерений. На радарограммах выделены границы слоев грунтового массива (1) и геологического основания (3). В 2012 г. на фоне отражений от горизонтальных границ выделяется дополнительная граница (2), которая к 2019 г. образует замкнутый слой. Локальный участок имеет линзовидную форму и характеризует изменение свойств на границе мерзлых и талых грунтов. По результатам мониторинговых исследований установлено, что талые зоны уверенно выделяются при максимальном промерзании грунтов. По данным визуальных наблюдений на участке выделенной таликовой зоны зафиксировано увеличивающееся разрушение поверхности дорожного полотна.

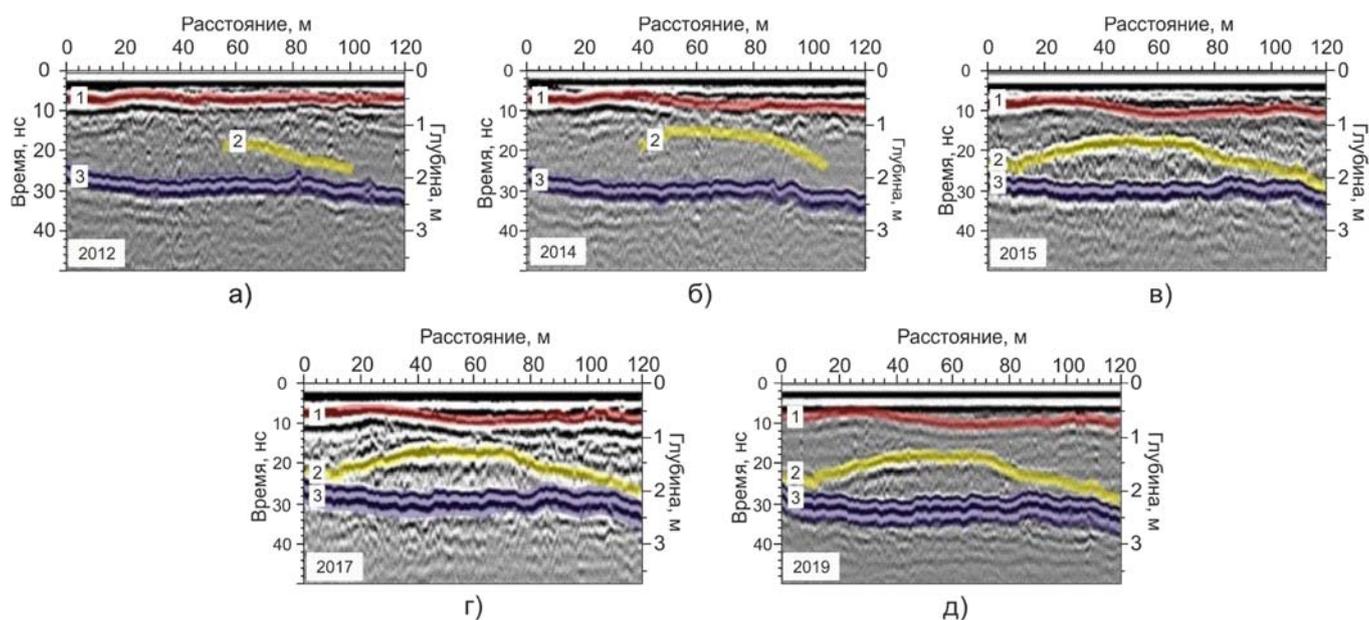


Рисунок 16. Результаты георадиолокационного мониторинга с 2012 по 2019 гг.  
Условные обозначения: 1 - граница дорожной одежды; 2 - дополнительная граница (аномальная зона); 3 - геологическое основание

Таким образом, разработана и апробирована технология выявления участков развития криогенных процессов в массивах мерзлых горных пород, включающая программно-методический комплекс для мониторинга радарограмм режимных георадиолокационных наблюдений, позволяющий систематизировать, хранить (БД), отображать результаты измерений и обработки (ГИС), а также обеспечивающий достоверную интерпретацию данных георадиолокации на основе установленных признаков волновых полей, связанных с участками повышенной влажности, пучения пород, зон суффозии. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании негативных криогенных процессов в грунтах оснований горнотехнических сооружений (защитные дамбы, автодороги, плотины и др.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований научно обоснованы и разработаны методические, технологические основы изучения горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны методом георадиолокации. Разработанные научно-методические основы расширяют возможности георадиолокации, обеспечивающие повышение точности, детальности и оперативности определения свойств, строения и состояния массивов горных пород, а также проведение мониторинга опасных криогенных процессов в грунтах оснований горно-технических сооружений. Совокупность результатов, полученных в работе, направлена на повышение качества геофизического обеспечения проектирования и планирования разработки россыпных месторождений, способствует росту технико-экономических показателей и обеспечению безопасности ведения горных работ в условиях криолитозоны, что имеет важное значение для решения задач по ускоренному развитию минерально-сырьевой базы страны.

Наиболее важные результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа результатов численного, физического моделирования и многочисленных натурных измерений, с учетом электрофизических свойств мерзлых горных пород и региональных климатических условий, разработаны георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии, достоверно отражающие особенности строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны. С использованием разработанных моделей установлены и экспериментально подтверждены условия распространения георадиолокационных сигналов в массиве многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений до глубины 20 м, по которым произведена оценка влияния геологических структурных неоднородностей и геокриологических объектов на параметры регистрируемых сигналов и волновых полей.

2. Разработаны алгоритмы, программно-методическое обеспечение обработки данных, интерпретационные признаки и критерии, учитывающие установленные закономерности изменения параметров георадиолокационных сигналов и особенности формирования радарограмм, получаемых при зондировании массивов мерзлых горных пород, обеспечивающие достоверную интерпретацию и оценку горно-геологических, геокриологических условий россыпных месторождений криолитозоны по данным георадиолокации.

3. Обоснована и реализована технология георадиолокационного картирования пространственного распределения продуктивных горизонтов россыпных месторождений криолитозоны, позволяющая прогнозировать зоны повышенной концентрации полезного ископаемого, приуроченные к палеодепрессиям, реликтовым водотокам, объектам коренного генезиса и т.п.

4. На основе анализа эмпирического корреляционного отношения георадиолокационных сигналов с высокоточной GPS привязкой их

местоположения разработана методика георадиолокационного картирования дражных полигонов россыпных месторождений криолитозоны, отличающаяся выявлением структурных особенностей геологического строения россыпи (мощность песков, участки повышенной валунистости, гипсометрия и нарушенность плотика). Данная методика имеет важное значение для оперативного контроля полноты и качества выемки золотоносных песков, а также для принятия соответствующих технологических решений.

5. Экспериментальными георадиолокационными исследованиями мерзлых горных пород, характерных для рыхлых отложений Центральной Якутии, с влажностью ( $W$ , %) от 3 до 20% определены закономерности динамики скорости распространения георадиолокационного сигнала ( $V$ , м/нс) в породах при их оттайке. На основе установленной эмпирической связи  $V$  и  $W$  разработана методика георадиолокационного мониторинга изменения влажности (7-25%) дисперсных горных пород. Она предполагает расчет относительного изменения скорости распространения георадиолокационного сигнала  $V$  в их талом и мерзлом состоянии, что определяется по данным разносезонных измерений с учетом состава исследуемых пород.

6. Экспериментально установлена возможность и получены результаты импульсного георадиолокационного каротажа обводненных электропроводящим раствором скважин в преломленных электромагнитных волнах спектра частот 10-50 МГц. Прослежены вариации амплитудно-частотных характеристик ГРЛ сигналов в зависимости от типов пород околоскважинного пространства.

7. На основе установленного эффекта пространственного гармонического резонанса на длинах волн соизмеримых с геометрическими размерами подземных льдов, проявляющегося в виде режекции спектра частот георадиолокационных сигналов, разработана методика картирования подземных льдов на участках ведения горных работ.

8. Разработан и апробирован программно-методический комплекс георадиолокационного мониторинга криогенного состояния массива горных пород криолитозоны, включающий специализированный алгоритм для выявления участков развития негативных криогенных процессов, позволяющий систематизировать, хранить в базе данных (БД), отображать результаты измерений и обработки в геоинформационной системе (ГИС). Комплекс обеспечивает достоверную интерпретацию данных георадиолокации на основе установленных признаков волновых полей, связанных с участками повышенной влажности, пучения пород и суффозии. Полученные результаты имеют важное значение при прогнозировании негативных криогенных процессов в грунтах оснований инженерных сооружений (дамб, автодорог, плотин и др.).

Важнейшие результаты исследований, представленные в диссертационной работе, широко внедрены в практику горно-геологических работ, производимых горнопромышленными предприятиями при добыче полезных ископаемых на россыпных месторождениях Якутии для выбора рациональных технологических решений и обеспечения безопасности проведения горных работ.

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

**В монографиях:**

1. Омелянченко, А. В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород: монография / А. В. Омелянченко, Л. Л. Федорова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.
2. Наука и техника: коллективная монография / Т. Н. Балк, М. А. Бауэр, В. И. Бирюлин, Л. Л. Федорова [и др.]; отв. ред. Я. А. Максимов. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. – 182 с.

**В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Нерадовский, Л. Г. Методические возможности георадиолокации мониторинга состояния мерзлых грунтов / Л. Г. Нерадовский, А. В. Омелянченко, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – №7. – С. 44-47.
2. Федорова, Л. Л. Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №8. – С. 153-158.
3. Соколов, К. О. Выявление границ продуктивного слоя алмазонасной россыпи частотно-временным анализом данных георадиолокации мерзлого горного массива / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, А. В. Омелянченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 147-151.
4. Федорова, Л. Л. Особенности обработки георадиолокационных данных при исследовании структуры геологических разрезов россыпных месторождений золота / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S4. – С. 100-107.
5. Федорова, Л. Л. О возможности применения георадиолокации при подготовке и обработке дражных полигонов / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. – С. 380-383.
6. Саввин, Д. В. Результаты экспериментальных исследований криогенного состояния горных пород методом георадиолокации в условиях открытой разработки месторождений криолитозоны / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, А. В. Омелянченко, М. Р. Никифорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 305-309.
7. Куляндин, Г. А. Определение электрофизических свойств пород горного массива методом георадиолокационного каротажа / Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова, А. В. Омелянченко, В. В. Оленченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 300-304.
8. 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.

9. 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.

10. Куляндин, Г. А. Георадиолокационные исследования структурных особенностей и обводненности перекрывающих пород при отработке угольных месторождений открытым способом / Г. А. Куляндин, А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова // Записки горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 49-53.

11. Федорова, Л. Л. Опыт применения георадиолокационных технологий при разработке алмазоносных месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Записки горного института. – 2013. – Т. 200. – С. 99-103.

12. 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.

13. Куляндин, Г. А. Георадиолокация геоструктур дражных полигонов месторождения реки Аллах-Юнь / Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 4. – С. 108-113.

14. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования горно-геологических условий дражных полигонов / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин // Горный журнал. – 2015. – № 4. – С. 10-14.

15. 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. 48-50.

16. 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.

17. 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.

18. Федорова, Л. Л. Программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в подповерхностных грунтах / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров, А. С. Стручков, Д. В. Саввин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S21. – С. 154-162.

19. 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. – № S21. – С. 514-521.

20. Саввин, Д. В. 3D картирование гипсометрии плотика дражных полигонов на примере месторождения р. Аллах-Юнь методом георадиолокации / Д. В. Саввин, А. С. Стручков, Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S21. – С. 504-513.

21. Федорова, Л. Л. Георадиолокационная оценка влажности горных пород / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 152-158.

22. Федорова, Л. Л. Георадиолокационная диагностика криогенных процессов в грунтах оснований автодорог г. Якутска / Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин, Д. А. Мандаров, М. П. Федоров // Инженерные изыскания. – 2017. – № 9. – С. 66-73.

23. 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 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 107-113.

24. Федоров, В. Н. Двухмерная электродинамическая модель неоднородной среды с потерями / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 132-137.

25. Саввин, Д. В. Опыт георадиолокационных исследований при инженерно-геологических изысканиях в Центральной Якутии / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, Е. Э. Соловьев // Инженерные изыскания. – 2018. – Т. 12. – № 7-8. – С. 92-100.

26. 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.

27. Федорова, Л. Л. Исследования геокриологических параметров массива горных пород для прогнозирования развития негативных криогенных процессов / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, Д. В. Саввин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 6. – С. 183-192.

28. Соловьев, Е. Э. Исследование геокриологических условий массива мерзлых горных пород неразрушающими электромагнитными методами / Е. Э. Соловьев, Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова // Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 31-37.

29. 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.

30. Нерадовский, Л. Г. Опыт изучения природы периодичности сигналов георадиолокации методами спектрального анализа / Л. Г. Нерадовский, Л. Л. Федорова // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 6. – С. 95-106.

31. Соколов, К. О. Алгоритм обработки и интерпретации георадиолокационных данных при изучении геокриологических структур многолетнемерзлых пород/

К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, А. А. Федоров // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – Вып. 3(59). – С. 75-80.

32. Sokolov, K. Prospecting and Evaluation of Underground Massive Ice by Ground-Penetrating Radar / K. Sokolov, L. Fedorova, M. Fedorov // Geosciences (Switzerland). – 2020. – Vol. 10. – № 7. – P. 1-14.

33. Нерадовский, Л. Г. Модели реконструированного участка автодороги «ВИЛЮЙ» в Якутске по данным георадиолокации / Л. Г. Нерадовский, Л. Л. Федорова // Разведка и охрана недр. – 2020. – № 11. – С. 40-48.

34. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования оттайки мерзлых горных пород в лабораторных условиях / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров, Г. А. Куляндин, Д. В. Саввин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 99-111.

35. Федорова, Л. Л. Исследование особенности строения техногенных отвалов методом георадиолокации / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, С. И. Поисеева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 243-254.

36. Savvin, D. V. Geophysical studies of permafrost conditions of the Kangalassky coal mine dam / D. V. Savvin, L. L. Fedorova, G. A. Kulyandin // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 38-46.

37. Fedorov, M. P. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data / M. P. Fedorov, L. L. Fedorova // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2022. – Vol. 19. – P. 1-5.

38. Федорова, Л. Л. Определение участков талых пород в многолетнемерзлом массиве по данным георадиолокации / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, Н. Д. Прудецкий // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 11. – С. 192-198.

39. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные модели массива горных пород Субарктической зоны Якутии / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий, С. Д. Шамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-2. – С. 129-140.

40. Куляндин, Г. А. Геофизический мониторинг криогенного состояния горных пород бортов и откосов горнотехнических сооружений на территории Якутии / Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова, М. П. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 105-115.

41. Федорова, Л. Л. Физическое моделирование георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в массиве рыхлых горных пород / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров, А. С. Свинобоев // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 11. – С. 106-111.

42. Федорова Л. Л. Георадиолокационные модели массива горных пород россыпных месторождений золота умеренной климатической зоны Якутии / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, С. Д. Шамаев // Горная промышленность. – 2025. – № 4S. – С. 87-93.

## Программы, базы данных, патенты:

1. Федорова Л. Л., Попов В. В. Программа обработки данных радиолокационных зондирований ледяного покрова водоемов в дистанционном режиме «Радар-Лед». – М.: ВНИИЦ, 2004. – № 50200401317.

2. Патент № 2548920 Российская Федерация, МПК G01S 13/95 (2006/01). Способ прогнозирования гидрологической обстановки на затороопасных участках реки / Находкин Н. А., Быков А. Н., Омеляненко А. В., Федорова Л. Л., Федоров М. П., Христофоров И. И., Кайгородов К. И., Омеляненко П. А. ; патентообладатель Республика Саха (Якутия), от имени которой выступает уполномоченное Государственным комитетом Республики Саха (Якутия) по инновационной политике и науке лицо – Государственное бюджетное учреждение «Академия наук Республики Саха (Якутия)» (ГБУ АН РС(Я)); заявл. 18.10.2013; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 6 с.

3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015614604, Российская Федерация. Программа «Модель зондирования четырехслойной среды георадиолокаторами серии ОКО» / Федоров В. Н., Федорова Л. Л., Константинов В. В. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук ; заявл. 15.12.2014; опубл. 20.05.2015, Бюл. № 5. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016615298, Российская Федерация. Программа «Автоматический поиск структурных особенностей горного массива на основе преобразования Гильберта данных георадиолокации»: дата регистрации 19.05.2016 / Соколов К. О., Федорова Л. Л.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук. № 2016612486; заявл. 22.03.2016; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 6. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620713, Российская Федерация. «Данные мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги»: дата регистрации 01.06.2016 г. / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Д. В. Саввин, А. С. Стручков; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук. – № 201620386; заявл. 05.04.2016; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 6.

6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017662819, Российская Федерация. «Двухмерная лучевая модель зондирования неоднородной среды георадиолокаторами серии «ОКО» : дата регистрации 17.11.2017 / Федоров В. Н., Федорова Л. Л., Константинов В. В. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения

Российской академии наук. – № 2017615315; заявл. 05.06.2017; опубл. 17.11.2017, Бюл. № 11. – Загерегистровано в Реестре программ для ЭВМ.

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621825, Российская Федерация. «Данные разносезонных мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги Вилюйского тракта (г. Якутск, Республика Саха (Якутия)) в период 2012 по 2024 гг.»: дата регистрации: 23.04.2025 г. / Федорова Л. Л., Шамаев С. Д., Свинобоев А. С.; правообладатель ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». – № 2025621825; заявл. 09.04.2025; опубл. 23.04.2025, Бюл. №5.

### **Прочие публикации:**

1. Fedorova, L. L. Georadar researches at exploitation of the mineral deposits of permafrost / L. L. Fedorova, G. A. Kulyandin // 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, 4-8 June 2012, Shanghai, China. – IEEE, 2012. – P. 567-570.

2. Fedorova, L. L. GPR modeling of placer deposits geological profiles of permafrost zone / L. L. Fedorova, K.O. Sokolov, D.V. Savvin, V.N. Fedorov, G.A. Kulyandin // 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 30 June-4 July 2014, Brussels, Belgium. – IEEE, 2014. – P. 301-304.

3. Fedorova, L. L. Studying of influence of temperature of rocks with varying humidity on GPR data / L.L. Fedorova, K.O. Sokolov, D.V. Savvin, A.P. Ammosov // 16th International Conference of Ground Penetrating Radar, 13–16 June 2016, Hong Kong, China. – IEEE, 2016. – P.1-4

4. Fedorova, L. L. Estimating Rock Moisture Based on Ground Penetration Radar Survey in Frozen and Thawed States / L. L. Fedorova, G. A. Kulyandin, D. V. Savvin // 17th International Conference of Ground Penetrating Radar, 18-21 June 2018, Rapperswil, Switzerland. – IEEE, 2018. – P.176-179.

5. Sokolov, K. O. GPR investigation of ice-filled cracks in loose deposits / K.O. Sokolov, N.D. Prudetckii, L.L. Fedorova, D.V. Savvin // 17th International Conference of Ground Penetrating Radar, 18–21 June 2018, Rapperswil, Switzerland. – IEEE, 2018. – P.331-334.

6. Fedorova, L. GPR research investigations of the geological structure of loose sediments at solid mineral deposits / L. Fedorova, A. Lejzerowicz, G. Kulyandin, D. Savvin, M. Fedorov // 8th International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», 8-10 September 2020, Khabarovsk. – EDP Sciences, 2020. – Vol.192. – P.1-8.

7. Savvin D.V. GPR Technologies for Predicting the Development of Dangerous Cryogenic Processes in Subsurface Soils // D.V. Savvin, L.L. Fedorova, E.E. Solovyov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 6-9 October 2020, Vladivostok. – IOP Publishing Ltd, 2021. – Vol.666. – P.1-8.

8. Savvin D.V. GPR Studies of The Permafrost Conditions of the Main Pipeline Area in Western Yakutia / D.V. Savvin, L.L. Fedorova, G.A. Kulyandin, E.E. Soloviev // 17th Conference and Exhibition Engineering Engineering and Mining Geophysics 2021, Gelendzhik. – EAGE, 2021. – Vol. 2021. – P.1-5.

Подписано в печать с электронного оригинал-макета 10.03.2026.

Тираж - 100 экз.

Напечатано в секторе НТП «ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская 78-А

Формат 60x84/16.