

На правах рукописи



Куляндин Гаврил Александрович

**МЕТОДИКА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО КАРТИРОВАНИЯ
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОЙ И
ОГРАНИЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ**

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Якутск – 2022

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

Научный руководитель: **Федорова Лариса Лукинична**, кандидат технических наук, доцент, ИГДС СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории георадиолокации.

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

Панжин Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, Институт горного дела УрО РАН, ученый секретарь

Ведущая организация: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Защита состоится «23» декабря 2022 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета 24.1.234.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 43. Тел/факс: 8(4112)33-59-30; e-mail: igds@ysn.ru.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук



Зубков Владимир Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Эффективность освоения месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны во многом зависит от совершенствования технологических приемов эксплуатационной разведки, которые были бы адаптированы к специфическим горно-геологическим особенностям строения и состояния многолетнемерзлых массивов, а также к осложнениям, в связи с их растеплением в условиях ведущихся горных работ. Наиболее прогрессивным неразрушающим методом для площадных исследований массива горных пород является георадиолокация. Несомненно, указанный метод не может вытеснить бурение и проходку шурфов, с помощью которых, в настоящее время преимущественно ведутся разведочные работы. Однако, он мог бы существенно их расширить, предоставив дополнительную информацию о строении и состоянии массива горных пород в межскважинном пространстве.

Как показала практика георадиолокационных исследований на действующих месторождениях, получение геофизической информации методикой непрерывного профилирования затруднено, а местами невозможно. Это связано с наличием естественных и искусственных преград на пути перемещения георадара: изрезанность рельефа, завалы валунов, водоемы и болота, инженерно-технические сооружения, горная техника и т.п. Неравномерное перемещение георадара между отвалами, по склонам или вблизи горной техники приводит к искажению данных непрерывной съемки. Кроме этого, на неровных участках и в местах скопления валунов не обеспечивается оптимальный режим излучения из-за потери контакта антенн с поверхностью. Недостаток информации может привести к искажению трехмерных построений при георадиолокационном картировании.

Таким образом, исследования, направленные на разработку более совершенного методического подхода к изучению строения и свойств горных пород в межпрофильном пространстве и получению данных георадиолокации в условиях пересеченной и ограниченной местности, позволяющего расширить область применения и повысить информативность георадиолокационного картирования массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, являются актуальными.

Степень разработанности темы

Перспективность метода георадиолокации при исследовании строения и состояния массива мерзлых горных пород месторождений полезных ископаемых доказана в работах ученых: А.В. Омеляненко, Л.Л. Федоровой, Л.Г. Нерадовского, А.Р. Annan, А.И. Калашника, Д.В. Саввина, К.О. Соколова и др. Показано, что с помощью георадиолокации возможно решение следующих задач: выявление структурных ловушек полезного ископаемого, определение направления россыпи, определение мощности рыхлых отложений, выявление факторов, осложняющих добычу (мерзлота, обводнение, подземный лед, талики, зоны трещиноватости и т.п.). Отмечено, что в условиях пересеченной местности и ограниченном пространстве подобные исследования существенно затруднены.

В части решения данной задачи известны труды исследователей, занимающихся георадиолокацией, использующих переориентацию антенн, как способ получения данных из одного местоположения в стесненных условиях. Так, известно устройство вращения георадара (патент US7755360 B1), которое позволяет осуществлять зондирования из одного местоположения (Michael J. Martin). Основным недостатком данного устройства является выполнение зондирований в отрыве от поверхности исследуемых пород. В результате часть волн отражается от поверхности и рассеивается, при этом появляются сигналы-помехи от окружающих приповерхностных объектов. Такой же недостаток у устройства (патент US6388629 B1) с возможностью одновременного вращения антенн георадара и опоры, с закрепленными на ней антеннами (Paul Albats, Jr. и др.). Известно, также, устройство (патент US6094157), позволяющее направлять сигнал радара под острым углом (угол Брюстера). Сканирование производится в вертикальной плоскости, что позволяет исследовать недоступные участки с одного местоположения (Dennis H. Cowdrick). Устройство сканирования представляет собой телескопическую башню, установленную на трейлере (передвижной платформе). Основным недостатком является сложность конструкции и большие размеры устройства сканирования, а также то, что зондирования осуществляются в отрыве от поверхности исследуемой породы. Для устранения вышеуказанных недостатков способов получения данных из одного местоположения, при георадиолокации на пересеченной местности, автором доработан антенный блок георадара и обоснована методика георадиолокационного картирования массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны профилированием в комплексе с угловым георадиолокационным сканированием.

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.), а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №12-05-31391, 2012-2013 гг.).

Объект исследования: массив горных пород россыпных месторождений криолитозоны, с недоступными для непрерывного георадиолокационного профилирования участками.

Предмет исследования: георадиолокационное картирование в условиях пересеченной и ограниченной местности.

Основная идея работы заключается в комплексном использовании непрерывного профилирования и специализированной методики углового георадиолокационного сканирования (УГС), что позволит увеличить плотность уникальных георадиолокационных трасс сигналов на радарограмме,

зарегистрированных из одного местоположения при изучении строения и состояния массива горных пород на участках пересеченной местности и ограниченного пространства.

Цель работы: разработка методики георадиолокационного картирования массива многолетнемерзлых горных пород россыпных месторождений криолитозоны в условиях ограниченной и пересеченной местности, позволяющей существенно повысить информативность данных площадных измерений.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи:**

1. На основе мирового опыта применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке месторождений определить факторы, усложняющие проведение полевых работ.
2. Обосновать способ зондирования в различных угловых положениях из одной точки наблюдений. Построить схемы формирования волновых картин при УГС для типовых геологических разрезов малоглубинных россыпных месторождений. Усовершенствовать антенный блок георадара для возможности регистрации его различных угловых положений.
3. Разработать и создать экспериментальную установку для получения данных георадиолокации из одной точки наблюдений и выполнить компьютерное и физическое моделирование для обоснования параметров углового георадиолокационного сканирования массива горных пород.
4. Разработать методику углового георадиолокационного сканирования для изучения строения и состояния массивов горных пород из одного местоположения.
5. Обосновать методику георадиолокационного картирования на основе комплексирования данных профилирования и углового георадиолокационного сканирования для участков с пересеченной местностью и ограниченным пространством, апробировать ее на месторождениях криолитозоны при изучении строения и состояния массивов горных пород.

Методы исследований: анализ и обобщение литературных источников, лабораторные, опытно-методические и экспериментальные работы, компьютерное моделирование, физическое моделирование, обработка, интерпретация и анализ данных георадиолокации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная методика углового георадиолокационного сканирования из одного местоположения, под различными углами антенного блока, обеспечивает увеличение плотности уникальных точек зондирования, что позволяет получать дополнительную локальную информацию о строении и состоянии массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны в недоступных для профилирования местах.

2. Возможность эффективного изучения методом георадиолокации особенностей строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, в условиях пересеченной местности и ограниченного пространства, достигается комплексированием методик

профилирования и углового георадиолокационного сканирования в опорных точках, с синхронизацией координат данных измерений системой спутникового позиционирования по площади картирования.

Научная новизна:

1. Для обеспечения георадиолокационных исследований в условиях пересеченной местности обоснована необходимость пространственной переориентации антенного блока в одном местоположении, позволяющей увеличить плотность уникальных точек зондирования, при этом оценить фазу и время задержки сигнала и тем самым повысить информативность и улучшить качество георадиолокационных данных.

2. Разработана методика углового георадиолокационного сканирования горных пород из одной точки наблюдений, позволяющая проводить исследования строения и состояния горного массива в условиях ограниченного пространства горных выработок и в местах, где затруднено или невозможно применение георадиолокационного профилирования.

3. Комплексная реализация методик профилирования и углового георадиолокационного сканирования в опорных точках пересеченной местности, с синхронизацией координат данных измерений системой спутникового позиционирования по площади картирования, позволила эффективно обрабатывать и интерпретировать результаты неравномерной георадиолокационной съемки для решения инженерно-геологических задач при эксплуатационной разведке россыпных месторождений.

Достоверность полученных автором результатов подтверждается компьютерным и физическим моделированием, большим объемом экспериментальных и натурных измерений, полученных с применением разработанной методики исследований; обработкой и интерпретацией данных георадиолокации, подтвержденных бурением.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной методики УГС для изучения строения и состояния горного массива не только на месторождениях, разрабатываемых дражным способом, но и в любых других условиях, осложненных техногенным влиянием и пересеченной местностью, когда георадиолокационное профилирование затруднено или невозможно. Эффективность исследований подтверждена реализацией разработанной методики на россыпных месторождениях полезных ископаемых Якутии: р. Аллах-Юнь (картирование гипсометрии плотика россыпи, определение мощности песков), участок «Молодо» (картирование границ талых зон), ГОК «Инаглинский» (картирование мощности отсыпки щебенистым грунтом).

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» (Научно-исследовательская работа, заказчик ЗАО ГДК "Алдголд", 2011 г.), «Инженерно-геофизические изыскания на месторождении «Джекконда»» (заказчик ООО «ПРОГРЕСС», 2016 г.), а также экспедиционных и поисковых работ: «Исследование возможности

применения метода георадиолокации для детального изучения дражных полигонов при разработке россыпных месторождений криолитозоны» (а/с «Дражник», 2013, 2014 гг.); на участках месторождений: «Молодо» (2021 г.), ГОК Инаглинский (2021 г.), Кангаласский угольный разрез (2007-2021 гг.).

Разработанная методика УГС и данные исследований реализованы при разработке месторождения россыпного золота р. Аллах-Юнь артелью старателей «Дражник», а также при проведении НИР ИГДС СО РАН и в учебном процессе Горного института Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Личный вклад автора. Представленные в диссертационной работе лабораторные и экспериментальные результаты выполнены лично автором. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследований по постановке задач, разработке и созданию экспериментальной установки, по разработке методики георадиолокации в условиях ограниченного пространства, в обработке и интерпретации данных измерений, систематизации и научном анализе полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований представлялись на: Международных научных конференциях: «Современные технологии освоения минеральных ресурсов» (Красноярск, 2008), «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (Хабаровск, 2009), «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), «XI международном симпозиуме по проблемам инженерного мерзлотоведения» (Магадан, 2017), «Problems of Complex Development of Georesources» (Khabarovsk, 2020), «Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics» (Perm, 2020; Gelendzhik, 2021), «Earth and Environmental Science» (Vladivostok, 2020), «Неделя горняка» (Москва, 2011, 2021), «Георадар-2017» (Москва, 2017), а также на: Всероссийских и региональных научно-практических конференциях: «Безопасность горного производства в Республике Саха (Якутия)» (Якутск, 2008), «ЭРЭЛ» (Якутск, 2009, 2012, 2013), «Проблемы горной науки: взгляд молодых ученых» (Якутск, 2012, 2014), «Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри» (Нерюнгри, 2012, 2013), «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России» (Якутск, 2016-2020, 2022), «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (Якутск, 2013, 2015, 2017, 2019, 2021), «Развитие технологий добычи и обогащения месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, Апатиты, Якутск, 2019).

Публикации. Основные положения исследований отражены в 16 публикациях, в том числе, в 8 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в 6 изданиях, индексируемых в системе Scopus и Web of Science, 1 патенте РФ на изобретение, 1 патенте РФ на полезную модель.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 132 наименований и 4 приложений.

Общий объем работы - 135 страниц машинописного текста, 3 таблицы, 66 рисунков.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. А.В. Омеляненко, за идею научной работы, переданный опыт и знания в области георадиолокации, к.т.н. Л.Л. Федоровой за полезные замечания и консультации при выполнении настоящей работы, коллективу лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН за помощь в проведении полевых работ, а также коллективу а/с «Дражник» за предоставление возможности реализовать свои планы и научные разработки на территории деятельности предприятия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе обоснована актуальность темы диссертационной работы. Рассмотрены аппаратура и методический опыт георадиолокационных исследований на месторождениях полезных ископаемых. Отмечены особенности георадиолокационных исследований в условиях, осложненных пересеченной местностью и ограниченным пространством. Дана оценка перспектив применения метода георадиолокации на территории месторождений криолитозоны (на примере россыпного месторождения золота р. Аллах-Юнь).

Во второй главе изложено обоснование возможности повышения эффективности изучения строения и состояния массива горных пород из одной точки наблюдений угловым георадиолокационным сканированием. Рассмотрено формирование волновой картины и технические средства реализации УГС. Выполнено компьютерное и физическое моделирование УГС. Описаны экспериментальные лабораторные установки для выполнения углового сканирования с воздуха, в воде и с поверхности исследуемых образцов горных пород.

Третья глава посвящена георадиолокационному картированию неоднородностей структуры горных пород месторождений криолитозоны в условиях пересеченной местности и ограниченного пространства. Для этого, в недоступных для исследований профилированием местах, предлагается использовать разработанную методику углового георадиолокационного сканирования. Также предложена последовательность обработки и варианты интерпретации данных георадиолокации. Визуализация результатов изучения строения массива горных пород.

В четвертой главе представлены результаты площадных георадиолокационных исследований на месторождениях криолитозоны с различными горно-геологическими условиями и задачами, полученные методикой профилирования и результаты применения разработанной методики УГС, в том числе в комплексе с профилированием.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработанная методика углового георадиолокационного сканирования из одного местоположения под различными углами антенного блока обеспечивает увеличение плотности уникальных точек зондирования, что позволяет получать дополнительную локальную информацию о строении и состоянии массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны в недоступных для профилирования местах.

Исследования по методике углового георадиолокационного сканирования выполняются особым способом с использованием доработанного антенного блока (АБ) георадара (Патент №141971, РФ, G01S 13/88 – 2014) (рис. 1). Для этого, в массиве горных пород подготавливают углубление полуцилиндрической формы и помещают в него антенный блок георадара (рис. 1а). При этом, изъятый грунт по бокам углубления формирует насыпь с уклоном, соответствующим предельным углам сканирования. Перед каждым зондированием производится корректировка положения АБ по стрелке-отвесу и шкале, подсыпается или изымается грунт для достижения максимально возможного контакта АБ с поверхностью (рис. 1б). Изменения углов происходят в секторе 70 градусов с шагом 5 градусов. В каждом из 15 угловых положений записывается файл длиной 100 трасс зондирования. Такое накопление трасс сигналов делается из соображений улучшения визуального восприятия радарограммы оператором при обработке и интерпретации. По завершении сканирования из всех файлов собирается синтезированная радарограмма общей длиной 1500 трасс.

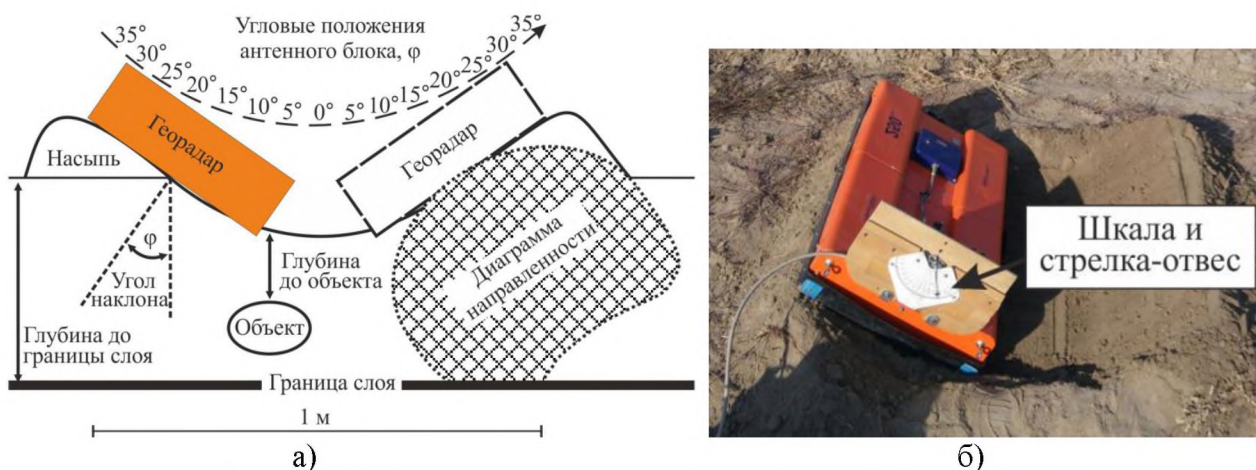


Рисунок 1 – Угловое георадиолокационное сканирование:

- а) схема выполнения углового георадиолокационного сканирования;
- б) доработанный антенный блок георадара «ОКО-2»

Волновая картина УГС будет более приближена к картине, получаемой профилированием, чем стационарным зондированием (непрерывным накоплением трасс на одном месте), т.к. происходит пространственное изменение положения антенного блока, и условия зондирования изменяются. Для примера на рис. 2 представлены геологические разрезы и схемы формирования волновых картин в однородных слоистых средах и с присутствием локального объекта.

Приемник и передатчик при угловом сканировании совмещены, поэтому в волновых схемах приняты как одна точка, из которой во все стороны распространяется сферическая волна. Каждая точка поверхности, на которую падает волна, становится источником сферических волн. Их регистрация в различных угловых положениях обеспечивается широкой диаграммой направленности экранированных антенн типа «бабочка». Построение отраженных волн в схемах выполнено с учетом закона Снеллиуса (угол падения равен углу отражения) и принципа Ферма (распространение волны происходит по кратчайшему пути), а углы преломления при переходе через границу не учитываются для упрощения построений. В схемах маленькими стрелками указаны направления падающей и отраженной волны по нормали к отражающей поверхности, т.к. только эти волны будут достигать приемника, остальные рассеются и поэтому не рассматриваются.

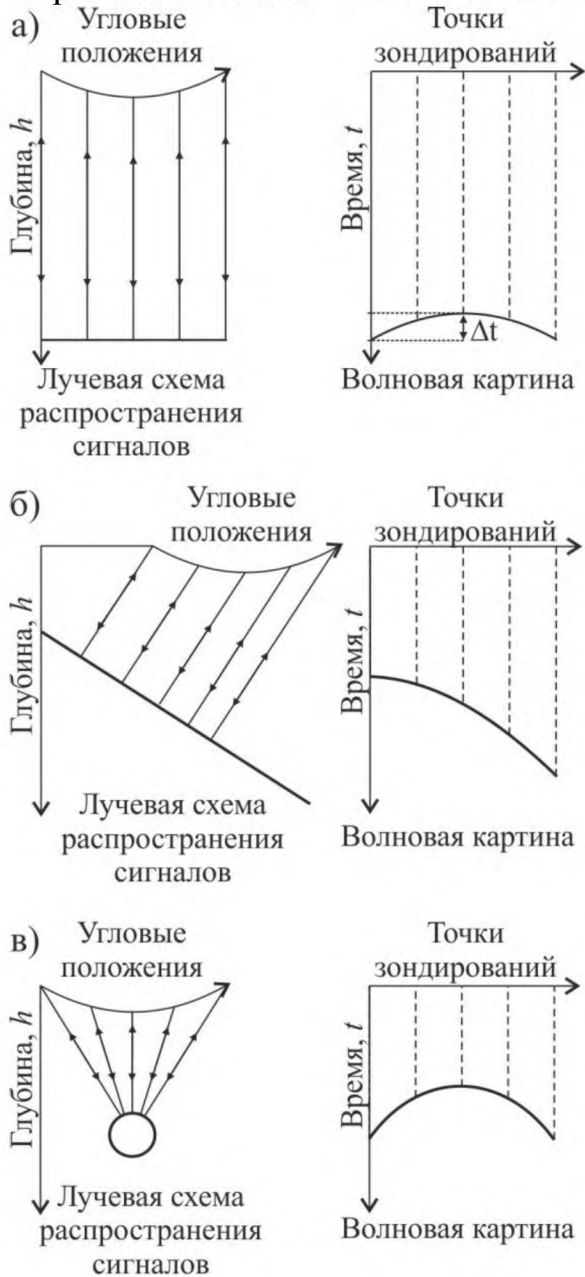


Рисунок 2 – Схемы формирования волновой картины для различных геологических разрезов при УГС: а) горизонтально-слоистый разрез; б) наклонно-слоистый разрез; в) однородный разрез с включением локального объекта

Как видно на рисунке 2а горизонтальная граница при двухслойном разрезе формирует волновую картину, состоящую из слегка изогнутой оси синфазности отраженных сигналов. Ее искажение на временном разрезе составит не более Δt (для АБ 250МГц георадара «ОКО-2», половина ширины АБ – $d = 0,46$ м, смещение АБ в углублении относительно поверхности – $\Delta h = 0,13$ м, при диэлектрической проницаемости – $\epsilon' = 7$, Δt составит не более 2,3 нс) и фактически связано с формой углубления, где выполняют угловое сканирование (рис. 1). Это практически незаметно на радарограмме для горизонтальных геологических границ в естественных условиях с неидеально ровными контактными поверхностями горных пород и грунтов.

В случае, когда граница между слоями горных пород наклонная, на радарограмме формируется схожая по направлению наклона ось синфазности, но изогнутая в вершине напоминающая годограф, вершина которого смещена в сторону подъема границы (рис. 2б).

Основным преимуществом УГС перед стационарным зондированием является формирование волновой картины от локального объекта схожей с радарограммой профилирования (рис. 2в). Дифрагированными волнами образуется ось синфазности, схожая с гиперболой при профилировании, что позволяет различить на радарограмме волновые образы локальных объектов и протяженных отражающих границ между слоями горных пород. Как известно, во всех трех случаях, приведенных выше (рис. 2), данные, получаемые стационарным зондированием, сформируют волновую картину из горизонтальных осей синфазности, и потому, будут не доступны для некоторых критериев оценки. Например, для определения конфигурации осей синфазности отраженных волн (параллельные, наклонные, волны дифракции), фазы и времени регистрации.

Физическое моделирование в емкости с песком показало, что при угловом сканировании происходит накопление отраженных сигналов от исследуемой горизонтальной границы. В результате накопления данных зондированиями из одного местоположения амплитуды регулярных сигналов возрастают, а непостоянные сигналы-помехи распределяются по временной области, теряя свою интенсивность – за счет этого повышается точность и достоверность исследований.

Далее осуществляется обработка радарограммы с применением различных процедур (фильтрация, коррекция затухания, регулировка контрастности радарограмм и т.д.), входящих в состав программного обеспечения для георадаров (GeoScan32 поставляется в комплекте с георадаром «ОКО-2»), с целью выделения осей синфазности от отражающей границы.

Описанная методика успешно апробирована на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь, разрабатываемом ООО артель старателей «Дражник», для выявления водоносного горизонта и кровли коренных пород. Георадиолокационные исследования проведены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250 (центральная частота 250 МГц). На участке, подготавливаемом к дражной отработке, получены данные профилирования, стационарного зондирования и углового георадиолокационного сканирования (рис. 3). При интерпретации использована информация по ближайшему шурфу (шурф №9, шурфовая линия №46), расположенному на удалении 0,5 км. По данным профилирования на глубине около 2-х метров выявлен водоносный горизонт в толще мерзлых песчано-гравийно-галечных отложений. На радарограмме он представлен протяженной осью синфазности (линия, соединяющая импульсы волн с одной фазой), образованной высокоамплитудными сигналами от верхней границы водоносного горизонта.

По аналогичным признакам водоносный горизонт прослеживается и на радарограмме стационарного зондирования. При угловом сканировании в результате изменения пространственного положения антенного блока, сигналы-помехи (волны дифракции от валунов, гальки и прочего обломочного материала) разошлись по времени регистрации, благодаря чему появилась возможность выделить протяженные оси синфазности сигналов,

соответствующие верхней и нижней границам водоносного горизонта, а также кровле коренных пород.

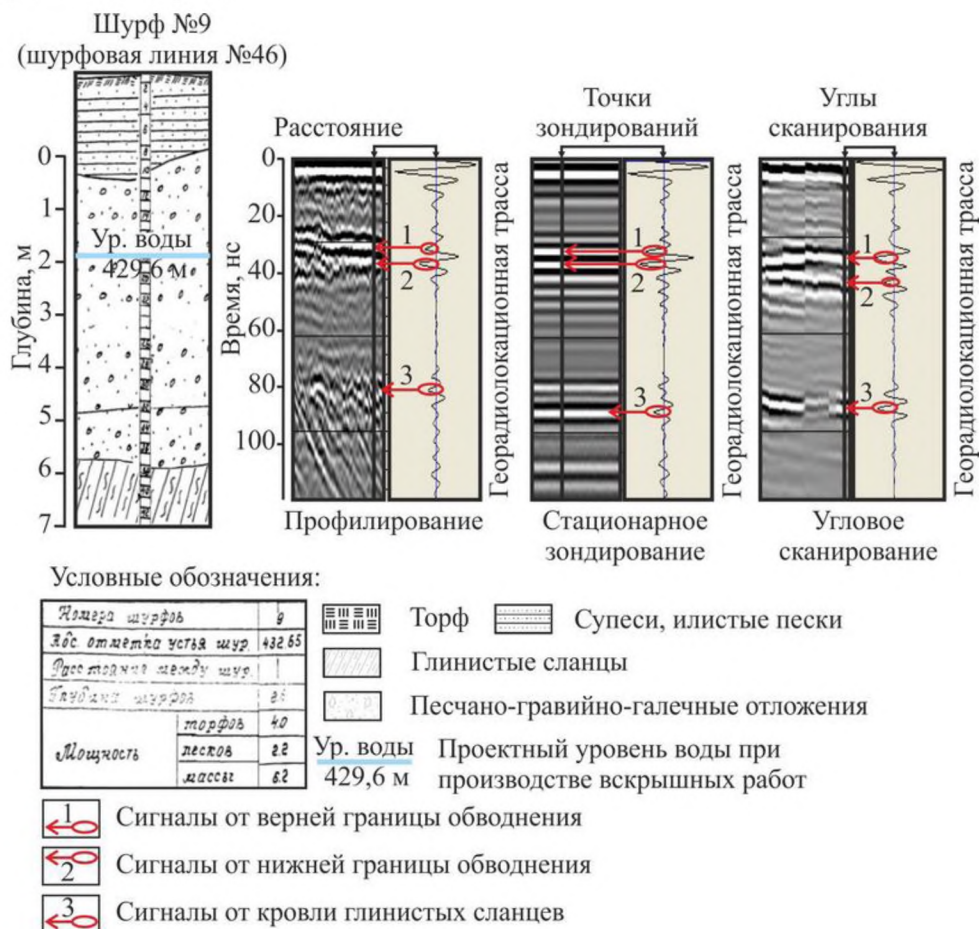


Рисунок 3 – Результат применения разработанной методики УГС для локального сбора данных георадиолокации на подготавливаемом к дражной отработке участке

Результаты моделирования и апробации показали, что угловым георадиолокационным сканированием, в отличие от стационарного зондирования, получают радарограмму с набором уникальных трасс сигналов, записанных под различными углами к отражающей границе из одного местоположения. В результате на радарограмме формируется волновая картина, позволяющая выделить оси синфазности сигналов от искомых объектов, и оценить фазу и время регистрации сигнала для достоверной интерпретации данных по различным критериям. Локальность сбора георадиолокационных данных по методике УГС позволяет получить достаточную информацию о поисковых объектах в межпрофильном пространстве и на участках, где профилирование невозможно.

2. Возможность эффективного изучения методом георадиолокации особенностей строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, в условиях пересеченной местности и ограниченного пространства, достигается комплексированием методик профилирования и углового георадиолокационного сканирования в опорных точках, с синхронизацией координат данных измерений системой спутникового позиционирования по площади картирования.

Для обеспечения достоверности и полноты выделения структурных неоднородностей, исследования проводятся по равномерной сети параллельных профилей, а в недоступных для профилирования местах измерения дополняются локальными зондированиями в опорных точках по методике углового георадиолокационного сканирования (рис. 4). Количество и расположение опорных точек определяется поставленной задачей и условиями местности. На приведенной для примера схеме предложено три опорные точки. УГС-1 расположена на окраине участка, между объектами, препятствующими прохождению непрерывного георадиолокационного профиля. Другие опорные точки (УГС-2 и УГС-3) расположены перед объектами, до которых невозможно выполнить профилирование. В результате, исследования в опорных точках позволили получить более точную информацию о форме и условиях залегания искомого геологического объекта.

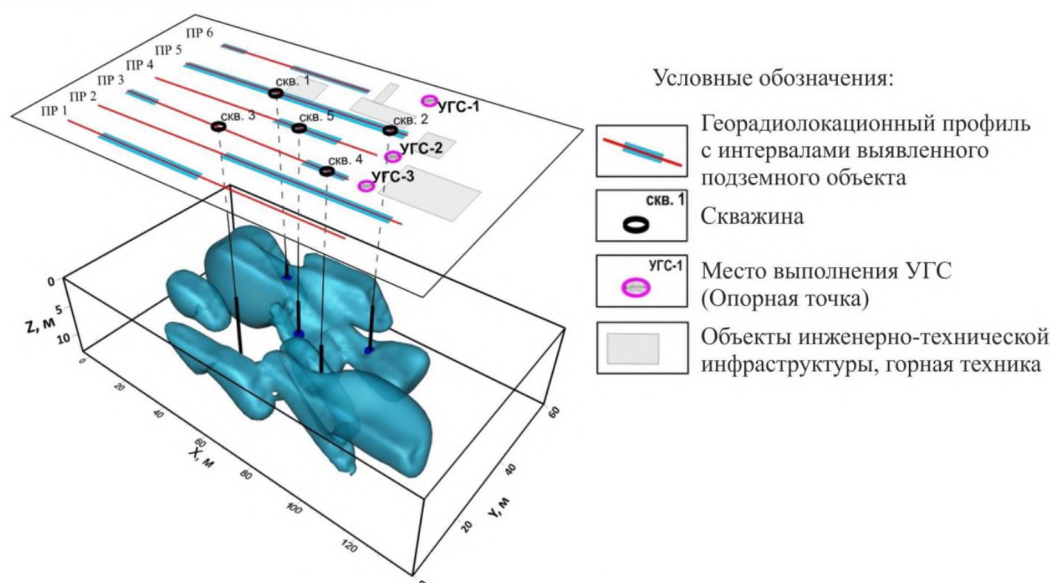


Рисунок 4 – Схема георадиолокационного картирования структурных неоднородностей массивов многолетнемёрзлых горных пород с использованием УГС в опорных точках в условиях пересеченной и ограниченной местности, где профилирование невозможно

Апробация методики выполнена на территории северной части Якутской алмазонасной провинции. Для обеспечения построения 3D-карт, измерения проводятся по методике площадного профилирования с равномерным смещением. Для получения информации о геокриологических структурах в межпрофильном пространстве и участках, где профилирование невозможно, выполнение полевых исследований осуществляется в опорных точках по методике УГС.

В качестве примера использования разработанной методики, на рис. 5 представлены результаты сканирования в опорной точке на обследуемом участке в окрестности скважины №3/7 (скважина на 7-ом метре по профилю №3). Записано 1,5 тыс. точек зондирований в секторе семьдесят градусов антенным блоком «АБ-250М» с шагом угловых положений пять градусов. Интерпретация границ, выделенных после обработки, основана на информации по скважине №3/7. Так, по данным УГС уверенно прослеживаются слои

слагающие массив многолетнемерзлых пород. В толще песчано-гравийно-галечных отложений присутствует горизонтальная граница на глубине около одного метра, связанная с отражением от крупнообломочного материала. При профилировании волновой образ от таких объектов представляется в виде «гипербол». Слой суглинков также разделен горизонтальной осью синфазности, но в данном случае такое разделение связано с изменением их свойств – появлением включений льда (с 5 до 6 м). Высокольдистые илесто-глинистые отложения мощностью полтора метра сверху ограничены песчано-гравийно-галечными отложениями, а снизу суглинками. На радарограмме их волновой образ представлен областью равномерно распределенных сигналов замкнутых между контрастными горизонтальными осями синфазности.

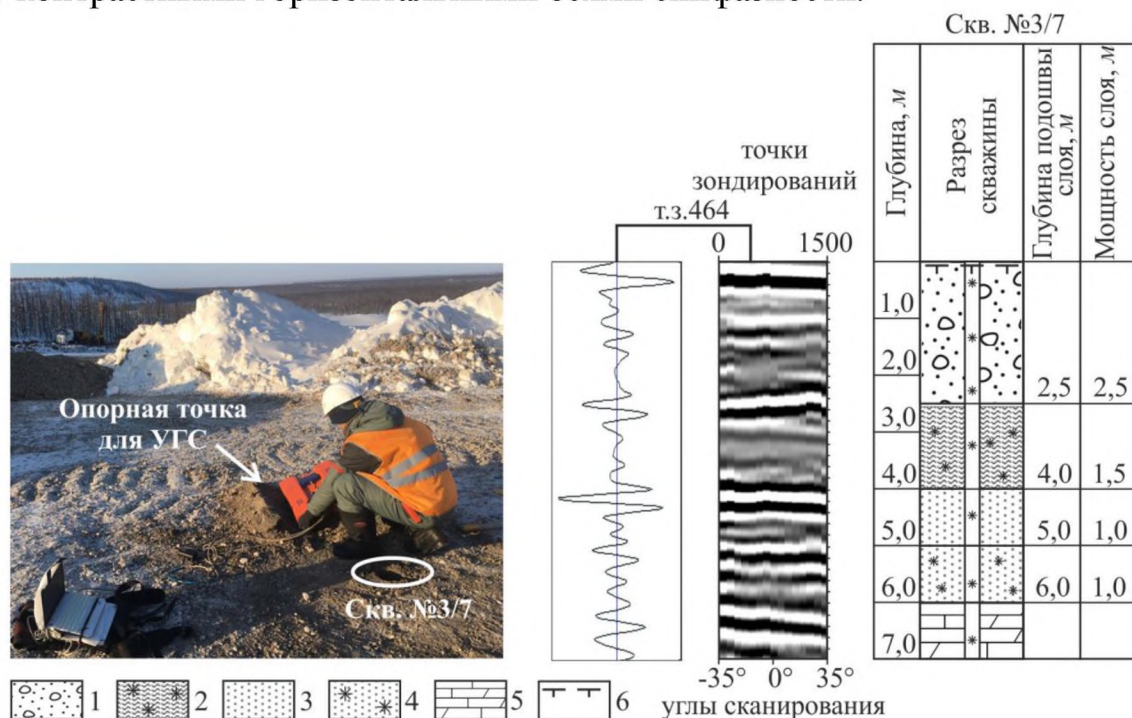


Рисунок 5 – Данные полевых исследований по методике УГС в опорной точке, рядом со скважиной №3/7: 1 – мерзлые песчано-гравийно-галечные отложения; 2 – высокольдистые илесто-глинистые отложения; 3 – суглинок темно-серый мерзлый; 4 – суглинок темно-серый с включением льда; 5 – доломиты; 6 – кровля мерзлых горных пород

Интерпретационные признаки присутствия талых грунтов в массиве мерзлых горных пород по всему участку определены по данным бурения в контрольных точках и радарограммы профиля №12 (рис. 6). На волновом поле этого профиля в интервалах 40 – 52 м и 72 – 88 м имеются «западения» осей синфазности сигналов, связанные с участками понижения подошвы песчано-гравийно-галечного слоя. В этих местах слой суглинка под илесто-глинистыми отложениями имеет в волновом образе хаотичные сигналы относительно высоких амплитуд (область сигналов обозначена пунктирными линиями на рисунке 6а). Такие волновые поля могут соответствовать нарушенной криогенной структуре суглинков в результате их растепления.

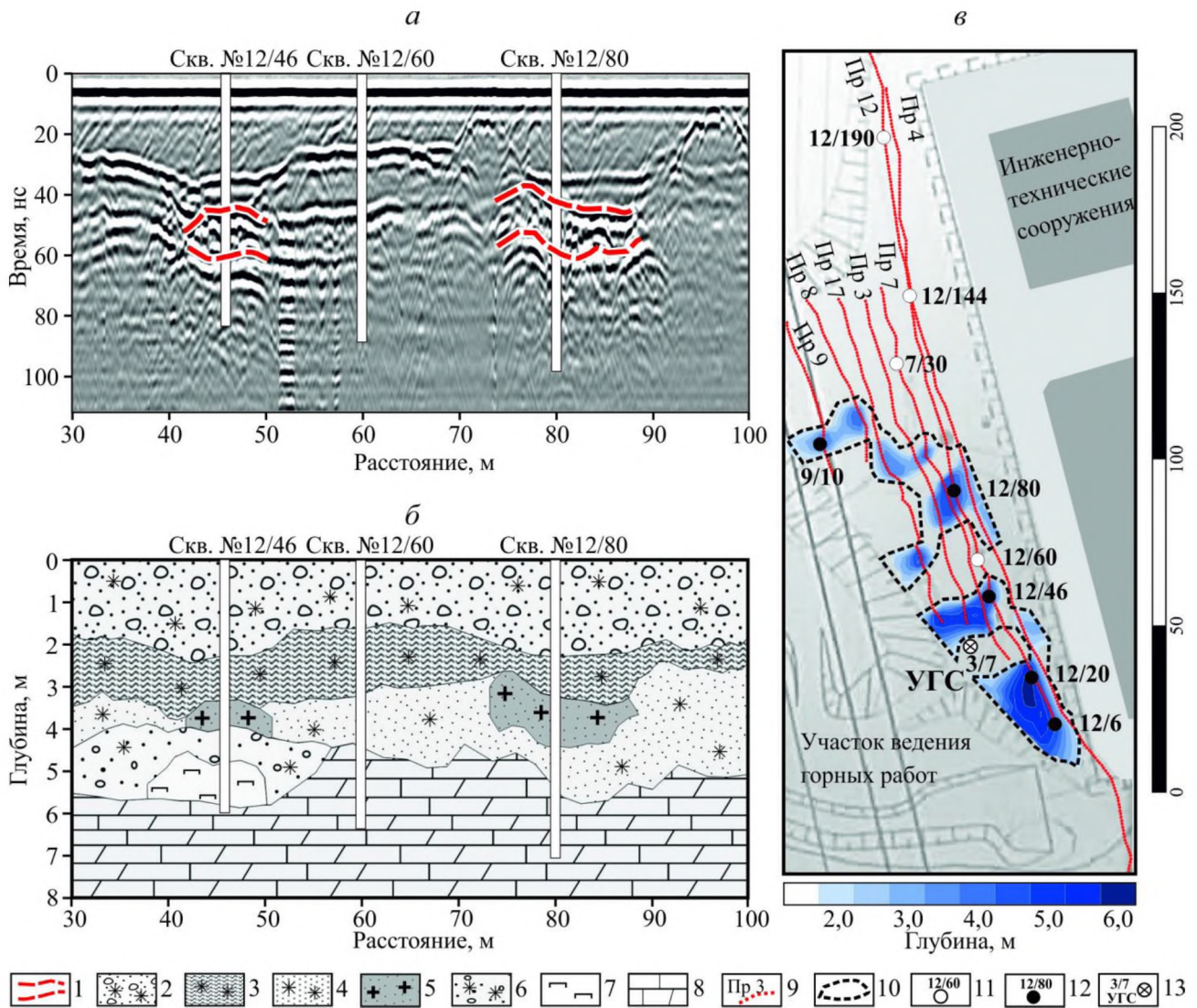


Рисунок 6 – Выявление зон талых пород по данным георадиолокации и бурения: (а – временной разрез; б – глубинный интерпретационный разрез) и карта распространения талых горных пород по участку (в): 1 – границы зон талых пород на радарограмме; 2 – мерзлые песчано-гравийно-галечные отложения; 3 – высокольдистые илисто-глинистые отложения; 4 – суглинок темно-серый мерзлый; 5 – суглинок темно-серый талый; 6 – песок льдистый мелкий с галечником; 7 – подземный лед; 8 – доломиты, 9 - георадиолокационный профиль; 10 - контур талых горных пород; 11 - скважина с мерзлыми горными породами; 12 - скважина с талыми горными породами; 13 - опорная точка УГС со скважиной

Для подтверждения правильности интерпретации зон выявленных аномалий волнового поля в контрольных точках на 46-ом, 60-ом и 80-ом метрах выполнено бурение скважин (скважины №12/46, №12/60 и №12/80 соответственно). В результате, как и ожидалось, талые породы обнаружены в толще суглинков по двум скважинам: в Сква. №12/46 на глубинах 3,1 – 4,0 м; Сква. №12/80 на глубинах 3,5 – 4,5 м. В скважине на №12/60 все горные породы выявлены в мерзлом состоянии. Интерпретационный геокриологический разрез по профилю №12 представлен на рис. 6б. Для расчета глубинного разреза исследуемого участка, сопоставлением данных бурения и времени задержки георадиолокационных сигналов, определены средние значения относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') пород: 4 – для мерзлых, 9 – для талых. Установлено, что под песчано-гравийно-галечным слоем, на глубине около 2 м, залегает толща высокольдистых илисто-глинистых отложений мощностью до 1

м, местами с включениями пластового льда. Далее по глубине прослежены суглинки и пески различного гранулометрического состава, залегающие на коренных породах.

Фрагмент участка с картой распространения талых зон (градиентная заливка в черном пунктирном контуре) в многолетнемерзлом массиве горных пород представлен на рисунке бв. Линии профилей расположены в крест предполагаемого направления деградации мерзлоты, для возможности обнаружения путей миграции техногенных жидкостей. Опорная точка для выполнения УГС расположена между профилем Пр7 и бортом карьера, рядом со скважиной 3/7. Обозначения на цветовой шкале соответствуют положениям подошвы слоя талых пород по глубине, которая находится в пределах 1,5 – 5,9 м. По карте видно, что деградация мерзлоты в массиве распространяется от инженерно-технических сооружений к борту карьера. При этом прослеживаются как минимум четыре потенциальные зоны обнажения талых пород по борту. Между двумя из них расположена опорная точка УГС, по данным которой талые породы не обнаружены. Таким образом, она разбивает одну большую талую зону на две части, с отдельными выходами на борт карьера. По данным георадиолокации площадь талых пород на обследуемом участке составила около 1600 м². Для заверки геофизических данных по некоторым профилям дополнительно пробурены скважины.

В результате проведенных исследований установлено, что методика УГС в опорной точке, существенно уточнила картирование талых зон по данным георадиолокационного профилирования, т.к. привнесла дополнительную информацию с неохваченного георадиолокацией участка межпрофильного пространства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-практической задачи по повышению детализации и информативности метода георадиолокации при разработке россыпных месторождений криолитозоны. В частности, предложена методика углового георадиолокационного сканирования и обосновано комплексное использование методик профилирования и углового сканирования в опорных точках в условиях пересеченной местности и ограниченного пространства, что позволит существенно расширить область применения метода георадиолокации на действующих горнодобывающих предприятиях, охватив исследованиями ранее недоступные участки.

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что основными факторами, осложняющими применение метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений являются: изрезанность рельефа, завалы валунов, водоемы и болота, инженерно-технические сооружения, горная техника.

2. Разработаны схемы формирования волновых картин при УГС для типовых геологических разрезов малоглубинных россыпных месторождений, позволяющие корректно интерпретировать данные компьютерного и физического моделирования, а также натурных георадиолокационных исследований.

3. Усовершенствован антенный блок георадара, что позволило обеспечить

возможность регистрации его различных угловых положений. Оригинальная конструкция антенного блока запатентована (Патент №141971, РФ, G01S 13/88 – 2014).

4. Обоснован и запатентован способ георадиолокационных зондирований в различных угловых положениях антенного блока (Патент №2561769, РФ, G01V 3/12. - 2015), позволяющий получать локальные данные из одного местоположения на участках, где непрерывное профилирование невозможно.

5. Разработаны и изготовлены экспериментальные установки для получения данных георадиолокации в лабораторных условиях из одной точки наблюдений для антенн 400 и 700 МГц георадара «ОКО-2».

6. На основе компьютерного и физического моделирования построена типовая волновая картина для горизонтально-слоистого разреза и обоснованы параметры углового георадиолокационного сканирования массива горных пород: предельные углы сканирования, шаг сканирования, количество трасс в каждом угловом положении, режим записи, последовательность обработки файлов различных угловых положений.

7. Разработана и предложена методика углового георадиолокационного сканирования для получения достоверных данных георадиолокации из одного местоположения в условиях ограниченного пространства при изучении строения и состояния массивов горных пород. Для выполнения УГС используется усовершенствованный антенный блок георадара «ОКО-2» (Патент №141971, РФ, G01S 13/88 – 2014) с частотой 250 МГц, снабженный шкалой в градусах и стрелкой-отвесом, позволяющими выполнять зондирования в секторе 70 градусов на глубину до 8 м.

8. Обоснована и апробирована методика георадиолокационного картирования на основе комплексирования данных профилирования и углового георадиолокационного сканирования для участков с пересеченной местностью и ограниченным пространством.

Важнейшим практическим результатом диссертационной работы является реализация разработанной методики УГС и георадиолокационного картирования плотика при отработке участка месторождения россыпного золота р. Аллах-Юнь в 2013-2016 годах (артель старателей «Дражник»).

Дальнейшее развитие представленной научной работы может состоять в автоматизации сбора и обработки локальных данных георадиолокации по методике УГС. Доработка методики предполагает возможность изучения свойств горных пород и грунтов из одного местоположения, разработку соответствующего программного обеспечения и усовершенствования аппаратуры.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Федорова, Л. Л. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 11. – С. 160 – 165.

5. Саввин, Д. В. Обнаружение талых грунтов в основаниях инженерных сооружений в криолитозоне методом георадиолокации / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Естественные и технические науки. – 2018. – №11. – С. 171 – 173.

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

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

8. Куляндин, Г. А. Изучение строения массива горных пород россыпных месторождений в условиях пересеченной и ограниченной местности методом георадиолокации // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 9. – С. 73-78.

В прочих научных изданиях:

9. Fedorova, L. L., Kulyandin, G. A. Georadar researches at exploitation of the mineral deposits of permafrost // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4-8, 2012. – Shanghai, China, 2012. – V.2. – pp. 571–574. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6254928> (дата обращения 22.09.2022).

10. Kulyandin, G. A., Omelyanenko, A. V., Omelyanenko, P. A., Methods of GPR Angular Scanning // 15th International Conference on ground Penetrating Radar (GPR 2014), June 30 - July 4, 2014. – Square Brussels Meeting Centre, Brussels, Belgium. – pp. 590 – 593. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6970489> (дата обращения 22.09.2022).

11. Патент на полезную модель № 141971 Российская Федерация, МПК G01S

13/88 (2006.01). Антенный блок георадара / Куляндин Г. А., Омельяненко П. А. ; заявитель и патентообладатель Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – № 2014102836/07 ; заявл. 28.01.2014 ; опубл. 26.06.2014, Бюл. № 17. – 1 с. : ил.

12. Патент на изобретение № 2561769 Российская Федерация, МПК G01V 3/12 (2006.01). Способ георадиолокации в условиях ограниченного пространства / Куляндин Г. А., Омельяненко П. А. ; заявитель и патентообладатель Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отд-ния Рос. акад. наук. – № 2014117846/28 ; заявл. 29.04.2014 ; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25. – 4 с. : ил.

13. Kulyandin, G. A., Fedorova, L. L., Savvin, D. V., Prudetskii, N. D. GPR mapping of bedrock of alluvial gold deposits in permafrost // Proceedings of 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR-2016). – Hong Kong, China, on 13-16 June, 2016. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7572638> (дата обращения 22.09.2022).

14. Fedorova L. L., Kulyandin G. A. Evaluation of ground conditions of open-pit development of deposits of cryolithozone by GPR // 16th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2020, Perm. – 2020. – Vol. 2020. – pp. 1 – 7. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202051082> (дата обращения 22.09.2022).

15. Kulyandin G. A., Fedorova L. L. Improvement GPR research of dredged polygons using the angular scanning technique // 16th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2020, Perm. – 2020. – Vol. 2020. – pp.1 – 5 URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202051142> (дата обращения 22.09.2022).

16. Kulyandin G. A., Fedorov M. P., Savvin D. V., Fedorova L. L. Identification of Technogenic Pollution of soil Environment by The GPR Method // 17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2021, Gelendzhik. – EAGE, 2021. – Vol. 2021. – pp.1 – 5. URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.202152089> (дата обращения 22.09.2022).