

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

На правах рукописи



**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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат техн. наук, доцент  
Л.Л. Федорова

Якутск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Современное состояние исследований строения массивов горных пород месторождений полезных ископаемых методом георадиолокации..	12
1.1 Георадиолокация, аппаратура и методический опыт георадиолокационных исследований на месторождениях полезных ископаемых.....	12
1.2 Особенности георадиолокационных исследований в условиях, осложненных пересеченной местностью и ограниченным пространством на месторождениях криолитозоны.....	21
1.3 Оценка перспектив применения метода георадиолокации на территории месторождений криолитозоны (на примере россыпного месторождения золота р. Аллах-Юнь).....	23
ВЫВОДЫ.....	27
2 Обоснование возможности повышения эффективности изучения строения массива горных пород угловым георадиолокационным сканированием.....	30
2.1 Способ углового георадиолокационного сканирования из одной точки наблюдений.....	30
2.2 Формирование волновой картины и технические средства реализации углового георадиолокационного сканирования.....	32
2.3 Компьютерное и физическое моделирование углового георадиолокационного сканирования.....	39
ВЫВОДЫ.....	49
3 Георадиолокационное картирование структурных особенностей массивов горных пород месторождений криолитозоны в условиях пересеченной местности и ограниченного пространства.....	50
3.1. Разработка методики углового георадиолокационного сканирования массива горных пород.....	50

3.2	Методика площадных исследований на участках месторождений, осложненных пересеченной местностью и ограниченным пространством.....	58
3.3	Последовательность обработки и интерпретация данных георадиолокации. Визуализация результатов изучения строения массива горных пород.....	64
	ВЫВОДЫ.....	78
4	Результаты георадиолокационных исследований особенностей строения горного массива месторождений криолитозоны Якутии.....	79
4.1	Площадные георадиолокационные исследования на месторождениях с различными горно-геологическими условиями.. ..	79
4.2	Апробация методики УГС на месторождениях криолитозоны.....	95
4.3	Применение методики УГС в комплексе с профилированием при площадных георадиолокационных исследованиях особенностей строения массивов горных пород и грунтов .....	99
	ВЫВОДЫ.....	109
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	111
	Список использованных источников.....	113
	Приложение А.....	132
	Приложение Б.....	133
	Приложение В. ....	134
	Приложение Г .....	135

## ВВЕДЕНИЕ

**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.

# 1 Современное состояние исследований строения массивов горных пород месторождений полезных ископаемых методом георадиолокации

## 1.1 Георадиолокация, аппаратура и методический опыт георадиолокационных исследований на месторождениях полезных ископаемых

Основы метода георадиолокации (подповерхностного радиолокационного зондирования) были заложены еще в 1904 г, немецким ученым Christian Hülsmeier. Он впервые предложил идею использования отраженных радиоволн для обнаружения кораблей и запатентовал ее 30 апреля 1904 г. (патент DE 165546) [1]. Несмотря на то, что прошло уже более 100 лет, метод все еще является достаточно новым и развивающимся. Это связано с развитием электроники и компьютеров, которые позволили методу широко распространиться в различные сферы жизнедеятельности человека особенно в конце XX века.

Трудами немецких ученых Gotthelf Leimbach и Heinrich Löwy в 1910-1911 гг. обнаружена возможность «просвечивания» горных пород с помощью радиоволн. В дальнейшем они предложили использовать радар для обнаружения скрытых объектов (патент DE 237944) и интерференционный метод для поиска руд и воды [2]. Для повышения разрешающей способности по глубине в 1926 г. немецким ученым Hülsenbeck предложена система импульсной радиолокации (патент DE 489434), которая широко используется и в современных георадарах [3, 4]. В 1956 г. El Said использовал разность между прямыми сигналами, передаваемыми по воздуху, и сигналами, отраженными от уровня грунтовых вод, чтобы определить глубину их залегания [3].

Основное развитие подповерхностная радиолокация получила после 1965г., когда начались исследования арктических ледников. Они оказались благоприятной средой для изучения радиоволнами и стимулировали интенсивное развитие методики измерений и совершенствование аппаратуры

для аэро радиозондирования [5]. Неоценимый вклад в эту отрасль внесли В.В. Богородский и М.И. Финкельштейн, которые помимо ледников исследовали горные породы и грунты [6-10]. В то же время большое внимание начали уделять исследованиям других геофизических объектов: уголь в шахтах - Cook (1973), подземные месторождения соли - Holser и др. (1972), Unterberger (1978) и Thierbach (1973), калия, мест захоронения ядерных отходов - Davis and Annan (1986). Dolphin et al. (1978) начали использовать радиолокацию в археологических раскопках и, конечно, в исследованиях многолетней мерзлоты - Annan and Davis (1976), Olhoeft [3].

Интенсивное развитие аппаратной части и внедрение георадиолокации в сельскохозяйственную, экологическую и другие отрасли привело к появлению различных компаний, выпускающих серийные георадары. Так, в 1988 году компания A-Cubed Inc. создала один из лидеров современного рынка георадаров - Sensors & Software Inc [3]. На данный момент наиболее крупными производителями георадаров также являются: Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) (Нью Гемпшир, США), US Radar Inc. (Матаван, Нью-Джерси, США), Geoscanners (Боден, Швеция), MALA Geoscience (Швеция), OYO corporation (Япония), Radar Systems Inc. (Рига, Латвия), Geozondas (Вильнюс, Литва), Transient Technologies LLC (Киев, Украина). Разработкой георадаров в России занимаются: ООО «Компания ВНИИСМИ» - георадары «ЛОЗА», ООО «ТАЙМЕР» - георадары «ГРОТ 12», ООО «Геологоразведка» - георадары «ТР-ГЕО», ФГУП СКБ ИРЭ РАН – георадары «ГЕРАД», Группа компаний «ЛОГИС-ГЕОТЕХ» - георадары серии «ОКО».

Зарубежные и российские георадары аналогичны по своим техническим характеристикам и конструкции. Имеющиеся отличия больше связаны с назначением георадара. Поэтому для примера более подробно можно рассмотреть георадар «ОКО-2» отечественного производства, как более доступный и массовый прибор для российского пользователя.

Группа компаний «Логис-Геотех» уже больше 20 лет поставляет георадары собственного производства [11]. Георадары серии «ОКО-2»

обладают рядом преимуществ, одним из которых является широкая линейка антенных блоков, выбор которых зависит от решаемой задачи, глубины и детальности исследования. В настоящее время на смену 2-ой серии георадров приходит новая – «ОКО-3». На рисунке 1.1 представлен антенный блок (АБ) георадара АБ-250/700МЗ, оснащенный двухчастотными антеннами, с центральной частотой — 250 и 700 МГц. Глубина исследований, в зависимости от типа грунта, составляет до 8 и 3 метров, при этом разрешающая способность: 0,25 и 0,1 м [12]. Синхронное зондирование на двух частотах дает возможность при одном проходе получить два результата - профиль с максимальной глубиной зондирования, а также профиль верхней части разреза с лучшим разрешением. Это сокращает время полевой съемки в два раза.



Рисунок 1.1 – АБ-250/700МЗ-антенный блок георадара «ОКО-3»

Основные технические характеристики антенн георадаров «ОКО-2» и «ОКО-3» совпадают и представлены в таблице 1.1. Как видно из представленных данных, для полевых исследований на месторождениях более подходящими по глубинным возможностям являются низкочастотные и среднечастотные антенны в диапазоне 50-700 МГц. Из них также можно выделить экранированные и неэкранированные дипольные антенны. Экранированные антенны рационально использовать вблизи горной техники и инженерно-технической инфраструктуры, а неэкранированные, наоборот, в

удалении от возможных антропогенных помех. Линейная конструкция неэкранированных антенн особенно имеет преимущество при их использовании в лесной или заросшей кустами местности.

Таблица 1.1 – Основные технические характеристики антенн георадара «ОКО-2» [11]

Тип антенного блока	Название антенного блока	Центральная частота, МГц	Максимальная глубина, м	Разрешающая способность, см
Рупорные	АБ-2500Р	2500	0,4	1,5
	АБ-2000Р	2000	0,6	2
	АБ-1700Р	1700	0,8	3
	АБ-1000Р	1000	1,5	4
	АБ-400Р	400	3	10
Экранированные	АБ-1700У	1700	1	3
	АБ-1200У	1200	1,5	5
	АБ-700М	700	3	10
	АБ-400М	400	5	15
	АБ-250М	250	8	25
	АБ-150М	150	12	35
	АБ-150	150	12	35
Двухчастотные	АБ-250/700М	250 и 700	8 и 3	25 и 10
	АБ-150/400М	150 и 400	12 и 5	35 и 15
	АБ-90	90	16	50
Неэкранированные	АБДЛ-Тритон	100	14	100
	АБДЛ-Тритон	50	18	50

Стремительное развитие компьютеров с конца XX в. позволило вывести обработку данных георадиолокации на новый уровень. С помощью программного обеспечения георадаров стало возможным выполнять сложнейшие преобразования больших массивов данных и строить площадные карты и представлять трехмерную визуализацию (Grasmueck, 1996; Annan и др., 1997) [3, 13]. Георадары «ОКО-2» и «ОКО-3»

поставляются с программой «GeoScan32» [12]. Она позволяет настраивать параметры съемки визуализировать данные во время записи, определять глубину залегания локальных объектов, проводить обработку с помощью различных процедур, а также строить трехмерную модель полученных данных. В качестве дополнительного программного обеспечения имеются разработки узконаправленных программ для определенных задач, а также разработки сторонних производителей [14]:

- «Анализ» - для автоматизированной обработки георадарных профилей, построения 3D разрезов исследуемых объектов.
- Cartscan - для трехмерной визуализации георадарных файлов, привязки георадарного профиля к карте местности, информация о найденных инженерных коммуникациях отображается на цифровом снимке Google Earth.
- Armscan 3D - для автоматического определения пространственного положения арматурных стержней, труб, кабелей и др.
- «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ» - для обработки стандартными опциями и специально разработанными алгоритмами и методами, повышающими информативность и глубинность георадиолокационных исследований [13].

Принцип действия георадара основан на излучении сверхширокополосных электромагнитных импульсов в подстилающую среду и регистрации их отражений от границ раздела слоев и объектов, имеющих различные электрофизические характеристики, это определяет его возможности и ограничения применительно к изучению строения и состояния массива горных пород месторождений полезных ископаемых (Рисунок 1.2) [15, 16].

Мерзлые горные породы, особенно мерзлые рыхлые отложения, характеризуются гораздо большими значениями электрического сопротивления, чем талые породы и поглощение энергии электромагнитных



волн в мерзлых породах существенно меньше, чем в талых [17-19]. Поэтому глубина зондирований на талых горных породах и грунтах уменьшается.

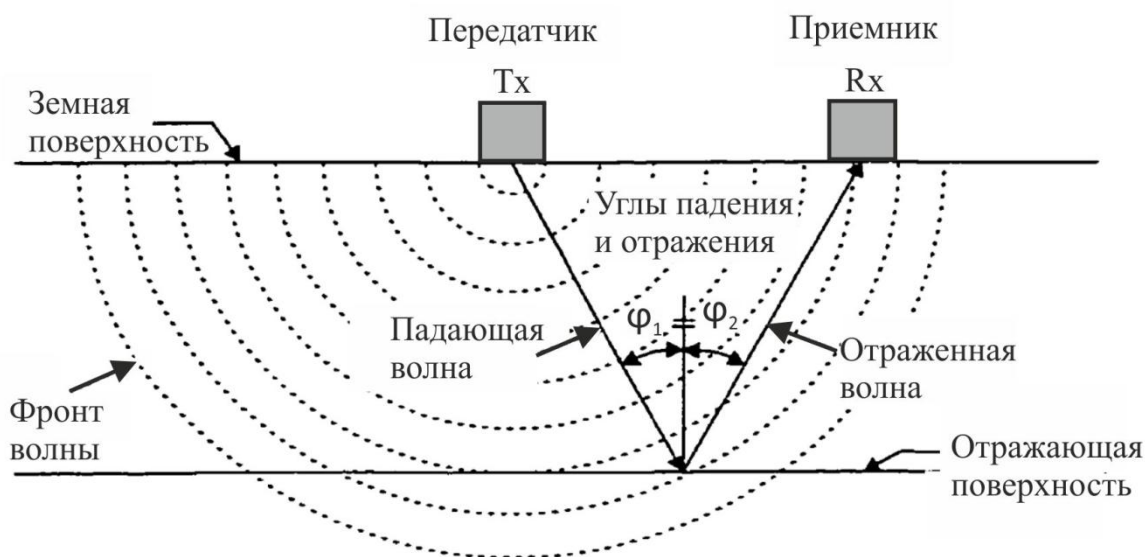


Рисунок 1.2 – Принцип действия георадара [15]

Для описания распространения электромагнитных волн применим лучевой метод и законы геометрической оптики, используемые в сейсморазведке [17]. При этом их отражение происходит с учетом коэффициента отражения Френеля [20-22]:

$$R_{1-2} = A_1/A_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

В каждом слое скорость распространения электромагнитных волн также различна и для сред с малыми потерями, такими как многолетнемерзлые породы, зависит только от вещественной части диэлектрической проницаемости [23]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

Это подтверждается и результатами исследования криогенного состояния горных пород [24]. Установлено, что георадиолокацией достоверно выявляются: глубина оттайки массива пород, зоны талых пород в многолетнемерзлом массиве, включения линз льда. Возможность

определения криогенного состояния массива позволяет использовать метод для оценки степени готовности полигона к отработке открытым способом.

В работе [25] отмечается, что метод георадиолокации имеет перспективы в решении задач горного дела при обследовании бортов, уступов и бермы в карьерах; кровли, потолочины и целиков в подземных горных выработках; обнаружении полостей и разрывных нарушений в законтурном массиве пород. Возможности георадиолокации распространяются и на техногенные образования, позволяя обследовать и вести мониторинг искусственных сооружений: насыпных грунтовых оснований, дамб, плотин, выявляя развитие деформационных процессов, трещиноватости, изменения структуры и т.п.

Согласно [26, 27], оценка точности и достоверности запасов полезных ископаемых проводится по результатам геологических, геофизических, геохимических, поисковых и оценочных работ. Но проведение всего комплекса работ материально очень затратно, и малым предприятиям не под силу вести детальные исследования месторождений, даже при широком использовании геофизических методов для интерполяции данных бурения и проходки шурфов. Георадиолокация в сравнении с другими геофизическими методами более гибкая к получению информации в условиях леса, зарослей кустарников и присутствия водоемов.

Для россыпных месторождений характерна концентрация полезных ископаемых в структурных ловушках различного типа, разделенных относительно бедными участками. Размеры ловушек разные и сеть разведочных скважин не позволяет детально изучить их расположение и размеры. К тому же при освоении месторождений, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород, возникает необходимость в детальном изучении геокриологической обстановки. Под воздействием проводимых горных работ происходят как естественные, так и техногенные изменения всего комплекса природных условий, влияющих на эффективность и рациональность освоения месторождений. С протаиванием

и промерзанием горных пород связаны негативные криогенные процессы, такие как: смерзание горных пород после рыхления, морозобойное растрескивание, морозное пучение, образование наледи, обводнение, суффозия, термокарст и солифлюкция, которые так же осложняют ведение горных работ. Таким образом, для эффективной и качественной разработки аллювиальных месторождений необходима весьма тщательная и детальная разведка [28]. Перечисленные задачи решаемы методом георадиолокации для малоглубинных исследований строения и состояния массивов многолетнемерзлых пород россыпных месторождений до глубин 20-30 м.

Стандартная методика георадиолокационных исследований на россыпных месторождениях включает: поиск априорной информации об участке исследований по данным ранее проведенных геофизических и геологических работ. Часто россыпные месторождения сложены различными песками и супесями, иногда с включениями глин. Пески и супеси обладают малым поглощением электромагнитной энергии, что позволяет изучать их георадиолокацией. Присутствие глин снижает глубинность метода, однако в условиях криолитозоны, когда все породы многолетнемерзлые, сохраняется возможность георадиолокационных исследований. Горизонтально слоистое залегание россыпей упрощает идентификацию слоев. Возможность прослеживать кровлю коренных пород и ее нарушенность позволяет выявлять западения и поднятия плотика, обнаруживать карстовые полости, трещины и разломы. На территории Якутии присутствуют и глубинные россыпи (р. Б. Куранах) с неровным рельефом плотика и залеганием коренных пород на глубинах до 60 м. Карстовые образования, имеющие весьма специфическое строение и состав горных пород, легко обнаруживаются по данным георадиолокации, однако, из-за хаотичных переотражений не удастся определить глубину залегания ненарушенных пород [29].

Эффективное изучение геофизических аномалий, выявленных электро- и магниторазведкой продемонстрировано на россыпном месторождении

Анабара (Якутия) [30] Методом георадиолокации выполнено картирование геологических структур коренных пород мерзлых рыхлых отложений на частоте 150 МГц. В результате прослежена верхняя граница песков, граница коренных пород и выявлены разломы с детальностью, достаточной для глубинного картирования. По данным георадиолокации построена карта основной россыпи с участками структурных разломов, которая сопоставлена с картой геофизических аномалий. Коэффициент корреляции георадиолокационного картирования и скважинного технологического опробования составил 0,83 для идентификации зон разломов с полезным ископаемым [30].

В работе [31] представлено изучение россыпного месторождения в Южной Индии методом георадиолокации на частотах 200 и 400 МГц. Показано, что георадиолокационные и визуальные данные по шурфу коррелируют. Георадиолокацией удалось проследить слои песков различного цвета и состава, в т.ч. слой песков, содержащий полезное ископаемое на глубинах 75-85 см.

Метод георадиолокации может быть использован для повышения эффективности разработки россыпных месторождений полезных ископаемых за счет более детального изучения геологических условий. С помощью площадных георадиолокационных измерений возможно выделение границ реликтовых водотоков, участков валунных включений, зон повышенной трещиноватости коренных пород, выполнения контроля за состоянием и свойствами горных пород массива [32-35].

В работе [36] оценена возможность применения георадиолокации для изучения горно-геологических условий дражных полигонов. Зондирования донных отложений с водной поверхности позволили определить конфигурацию дна водоема до глубины 8 м, выявить неоднородности донных отложений вблизи берега до глубины 7 м от дна и распределение множества маломерных объектов по дну котлована. Исследования с земной поверхности

позволили проследить границу плотика на глубинах около 12 м, а также локализовать зоны, осложняющие добычу (мерзлота, валунистость).

1.2 Особенности георадиолокационных исследований в условиях, осложненных пересеченной местностью и ограниченным пространством на месторождениях криолитозоны

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 их строения и состояния, а также к осложнениям в условиях ведущихся горных работ. Метод георадиолокации наиболее подходит для использования в условиях действующего месторождения и позволяет вести неразрушающий контроль за состоянием массива горных пород [37-40]. Однако очевидно, что получение геофизической информации методикой непрерывного профилирования на действующих месторождениях затруднено, а местами невозможно [41]. 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 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. Возникающие в результате этих факторов помехи на волновом поле радарограмм затрудняют интерпретацию и без того сложных данных [22,42]. Недостаток информации, в свою очередь, может привести к искажению трехмерных построений при георадиолокационном картировании. Повышение качества полевых данных может быть достигнуто разработкой новых способов регистрации сигналов

георадиолокации [43].

Проведение полевых исследований на участках с пересеченной местностью затруднено, как и последующий анализ, обработка и интерпретация георадиолокационных данных [43, 44]. Кроме того, глубинные возможности георадара определяются энергетическим потенциалом и основной частотой зондирования, которая, в свою очередь, влияет на геометрические размеры антенного блока. Допустимыми размерами, позволяющими свободно оперировать антенным блоком в пространстве (менее 1 м в длину) и достаточной глубиной зондирования (до 8 м) обладают антенные блоки в диапазоне частот 250-700 МГц. При этом допустимо использование антенн 1000-2000 МГц для изучения ближней зоны, глубиной до 1 м. С учетом этих условий, подбирают аппаратуру, обеспечивающую достаточную глубину и подходящую по массогабаритным характеристикам к решению конкретной задачи на выбранном участке.

Для изучения межпрофильного пространства могут потребоваться дополнительные исследования. Методика площадной съемки может включать в таком случае не параллельные профили, а распределенные по площади криволинейные профили с координатной привязкой георадиолокационных данных. Поэтому есть необходимость в совершенствовании методического подхода к изучению строения и свойств горных пород в межпрофильном пространстве и получению данных георадиолокации в условиях пересеченной и ограниченной местности. Вероятность получения положительного результата в сложных условиях увеличивается при георадиолокации дискретными зондированиями, либо параметрическими зондированиями в окрестности одной точки наблюдений [45].

Известны труды российских и зарубежных ученых, использующих пространственную переориентацию антенн (в том числе наклонную фокусировку) для расширения области применения и повышения информативности метода георадиолокации в труднодоступных местах [46-

48]. Так, известно устройство вращения георадара (патент US7755360 B1), которое позволяет осуществлять зондирования георадаром из одного местоположения [47]. Оно представляет собой опорную установку, с размещенным на ней радаром. Основным недостатком данного устройства является то, что зондирования осуществляются в отрыве от поверхности исследуемых пород. В результате часть волн отражается от поверхности и рассеивается, при этом, возможно появление сигналов-помех от окружающих объектов. Такой же недостаток у устройства (патент US6388629 B1) с возможностью одновременного вращения антенн георадара и опоры, с закрепленными на ней антеннами [48]. 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 [45]. Устройство сканирования представляет собой телескопическую башню, установленную на трейлере (передвижной платформе). Башня снабжена двигателем для изменения угла наклона и для перемещения антенн радара. Основным недостатком является сложность конструкции и большие размеры устройства сканирования, а также то, что зондирования осуществляются в отрыве от поверхности исследуемых пород, при этом, возможно появление сигналов-помех от окружающих объектов.

С учетом отмеченных сложностей выполнения георадиолокации в условиях ограниченного пространства и пересеченной местности, а также выявленных недостатков у существующих разработок, прослеживается необходимость в совершенствовании способов получения данных георадиолокации для изучения строения и свойств горных пород.

1.3 Оценка перспектив применения метода георадиолокации на территории месторождений криолитозоны (на примере россыпного месторождения золота р. Аллах-Юнь)

На территории Якутии практически все месторождения находятся в зоне распространения многолетней мерзлоты, что уже располагает к ожиданиям получения положительных результатов георадиолокации горных пород [49, 50]. Однако каждое месторождение по-своему уникально и даже в пределах своих границ может иметь отличительные участки. Здесь также следует учесть такие факторы, как состав пород (для определения диапазона значений вещественной части диэлектрической проницаемости -  $\epsilon'$ ) и общее геологическое строение месторождения в пределах исследуемых глубин (для построения модели георадиолокационного разреза), которые влияют на возможности георадиолокации [51].

При рассмотрении россыпного месторождения золота Аллах-Юнь, в качестве объекта георадиолокационных исследований, по данным отчета [52] отмечена низкая сохранность материалов разведки по участку «Мост», а также нет данных для оценки техногенных образований (отработанных площадей) по месторождению, что уже вызывает интерес для проведения георадиолокационных работ.

Район месторождения р. Аллах-Юнь характеризуется практически повсеместным распространением золотоносных россыпей, к настоящему времени в большей степени отработанных. Большинство известных россыпей относится к мелкозалегающим. Россыпь р. Аллах-Юнь, залегающая в современных отложениях, является пойменно-террасовой (долинной), протяженностью около 36 км. Мощность торфов изменяется от 2,7 м в пойме до 10 м в пределах пойменных террас. Мощность песков колеблется от 0,4 до 5,2 м [52]. Следовательно, глубина исследований может составить около 15 м, что на практике и по техническим характеристикам достижимо георадаром на частоте 50 МГц (Таблица 1.1).

Разрез рыхлых отложений современного звена двухслойный [52]:

- верхний слой представлен осадками пойменных фаций аллювия — суглинки, супеси, илистые пески, илы с растительным детритом и прослоями торфа и льда, мощность слоя от 0,5-1,0 м до 6-10 м;



- нижний слой представлен песчано-гравийно-галечными, валунно-галечными отложениями русловых фаций смешанного литологического состава и в разной степени золотоносных, мощность слоя варьирует от 2,0-3,0 м, на относительно выровненных участках палеорельефа до 10-15 м в наиболее пониженных участках днища долины р. Аллах-Юнь. Размер гальки не превышает 10 см в поперечнике, а валунов 20-30 см, редко встречаются и 50 см.

В основном, применение георадара на частоте 250 МГц будет достаточным для выделения границ нижнего слоя до глубин 8 м, в случае снятой вскрыши, а участки с глубиной 10-15 м могут быть дополнены на частотах 50-100 МГц [53]. В целом же, на радарограмме ожидается горизонтально-слоистый разрез и, вероятнее всего, слой пласта песков не выявится георадиолокацией, т.к. по данным разведки [52] он не имеет резко выраженных литологических границ в вертикальном разрезе и устанавливается только опробованием. Золото в россыпи тяготеет к нижним горизонтам русловых отложений, характеризующимся повышенным содержанием валунного материала, в ряде случаев проникая в выветрелые и трещиноватые породы плотика на глубину до 1,2-1,6 м. Поэтому, выявляя на радарограммах участки валунистости и нарушенные зоны в коренных породах можно предположить, что они имеют повышенное содержание золота. Присутствие валунов также позволит определиться со значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и, следовательно, с глубинами по георадиолокационному разрезу используя программное обеспечение и соответствующие процедуры обработки [12,54].

Месторождение расположено в области распространения многолетней мерзлоты, чему способствуют отрицательный годовой баланс температур и сравнительно небольшая мощность снегового покрова. Мощность толщи многолетнемерзлых пород колеблется от 100-200 м в пониженных участках рельефа до 350-400 м под высокими водоразделами, уменьшаясь до первых десятков метров в долинах крупных рек. Температура мерзлых грунтов на

глубине до 10 м колеблется от минус 4°С до минус 6°С. Многолетней мерзлотой поражены все коренные породы района и рыхлые отложения склонов и долин рек. Источников подземных вод, не замерзающих зимой, в районе месторождения не выявлено [52]. В таком случае, очевидно, что георадиолокационные работы целесообразно проводить в зимне-весенний период, когда вся толща горных пород промерзла. Значения диэлектрической проницаемости при этом составят 4-9, что характерно для мерзлых рыхлых отложений [49].

Сезонные подрусловые талики выявлены на протяжении всей долины р. Аллах-Юнь. Деятельность этих таликов зависит от годового баланса температур (отрицательный) и мощности снегового покрова (сравнительно небольшая). Считается, что зимой они полностью промерзают и восстанавливаются в течение летнего периода. Ширина их немногим превышает ширину русла реки, мощность талых рыхлых отложений в них составляет 3,0-3,5 м. Таким образом, влияние таликов на георадиолокационные данные будет минимальным опять же в весенний период.

Мощность деятельного слоя колеблется от 0,2-0,3 м до 3,0-3,5 м. Глубина сезонного оттаивания непостоянна и зависит от экспозиции склонов, литологического состава грунтов и характера растительного покрова. На склонах северной экспозиции и в покрытых мхом речных долинах она не превышает 0,2-0,3 м, на обнаженных склонах глубина протаивания колеблется от 0,8 до 1,2 м. Илистые породы оттаивают очень медленно, а песчано-галечные отложения в течение лета протаивают на глубину 3,0-3,5 м [52]. В случае, если есть необходимость определения глубины сезонного оттаивания, то это возможно произвести георадаром с центральной частотой 400-250 МГц. В соответствии с техническим описанием для георадаров «ОКО-2» [53] разрешающая способность при этом составит от 0,15 до 0,25 м.

По данным отчета [52] долина р. Аллах-Юнь опосредована буровыми линиями 1200\*40 м, и частично разведана шурфовым способом с плотностью

сети 1600-800-400\*40 м, местами до 200\*40-20 м. Некоторые участки долины разведывались шурфами по сети 600-750\*40 м. Разведка месторождения продолжается в процессе отработки. В течение 2001-2004 годов, а/с «Дражник», проводила на месторождении поисково-разведочные работы. В качестве основного средства разведки принято колонковое и ударно-вращательное бурение. Плотность ранее созданной разведочной сети сгущена до 200-250x20 м. Оптимизировать буровые работы возможно с применением в разведке георадиолокации, что позволило бы дополнить существующую сеть непрерывными радиолокационными разрезами и площадным картированием рельефа плотика.

Также следует отметить весьма плохую сохранность материалов разведочных работ, проведенных на площади участка Мост [52]. У недропользователя отсутствуют геологические разрезы по разведочным линиям (ш.л. №80, б.л № 2328), имеющийся разрез по буровой линии №2331 невозможно привязать к плану подсчета запасов. На плане подсчета запасов нет номеров буровых скважин или они вынесены таким образом, что рельеф поверхности буровой линии не совпадает с рельефом поверхности этого плана.

## ВЫВОДЫ

По обзору георадиолокационного оборудования показано, что зарубежные и российские георадары аналогичны по общим техническим характеристикам и конструкции. У многих производителей оборудования имеется широкая линейка антенных блоков, выбор которых зависит от решаемой задачи и глубины исследования. Наиболее новые модели оснащены двухчастотными антеннами. Синхронное зондирование на двух частотах дает возможность при одном проходе получить два результата - профиль с максимальной глубиной зондирования, а также профиль верхней части разреза с лучшим разрешением. Это сокращает время полевой съемки в два раза. С помощью программного обеспечения георадаров возможно

выполнять сложнейшие преобразования больших массивов данных и строить площадные карты и представлять трехмерную визуализацию.

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 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 по изучению строения и свойств горных пород в межпрофильном пространстве и получению данных георадиолокации в условиях пересеченной и ограниченной местности, являются актуальными.

Целью запланированных исследований является 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.

## 2 Обоснование возможности повышения эффективности изучения строения массива горных пород угловым георадиолокационным сканированием

### 2.1 Способ углового георадиолокационного сканирования из одной точки наблюдений

Как отмечалось выше, при георадиолокации на участках открытых горных работ, ограниченных антропогенным влиянием либо природными условиями, получение данных затруднено [39]. Неравномерное перемещение георадара между отвалами при помещении в труднодоступные места или вблизи горной техники приводит к искажению данных непрерывной съемки. Кроме того, на неровных участках и в местах скопления валунов не обеспечивается оптимальный режим излучения из-за потери контакта антенн с поверхностью. Для осуществления зондирований в условиях ограниченного пространства и пересеченной местности предлагается новый способ георадиолокационных исследований горных пород – угловое сканирование (Рисунок 2.1) [55, 56]. Данный способ позволяет получать радарограмму с набором уникальных трасс сигналов, записанных под различными углами к отражающей горизонтальной границе из одной точки наблюдений (одного местоположения). Последовательность сигналов на радарограмме при этом образует волновую картину (состоящую из  $n$  точек зондирований) с осями синфазности аналогично реализации методики профилирования (Рисунок 2.2) [57, 15]. Для выполнения исследований угловым сканированием применяется доработанный антенный блок георадара [58]. При этом на поверхности выполняют углубление полуцилиндрической формы, в котором осуществляют зондирование ( $k$  – количество (номер) точек зондирований) в различных угловых положениях ( $\varphi$ ) антенного блока георадара, для чего перемещают его по поверхности углубления ( $m$  – количество перемещений (номер углового положения)), а измерения углов зондирований выполняют

по шкале и стрелке-отвесу, размещенным на антенном блоке [58]. В результате накопления данных из одного местоположения выделяются регулярные сигналы, и увеличивается отношение «сигнал–шум», за счет чего повышается точность и достоверность исследований.

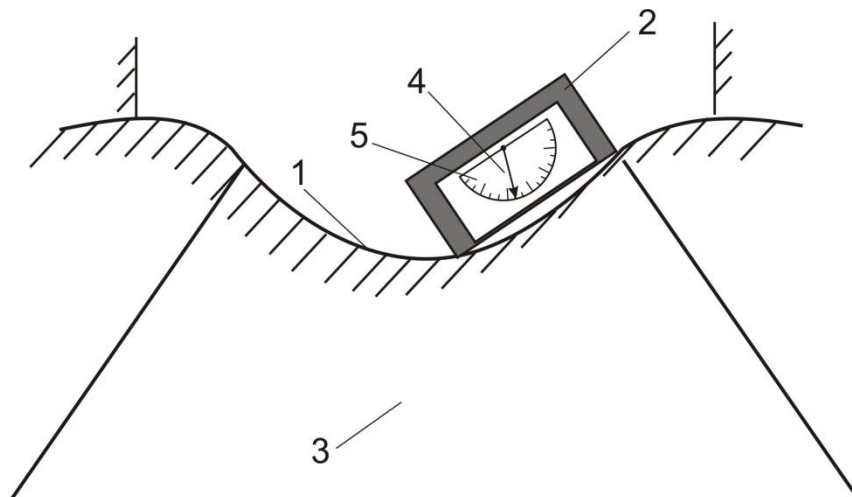


Рисунок 2.1 – Схема выполнения углового сканирования: 1 – полуцилиндрическое углубление в исследуемых горных породах; 2 – антенный блок георадара; 3 – область подповерхностного пространства, охваченная сканированием; 4 – стрелка-отвес; 5 – шкала в градусах

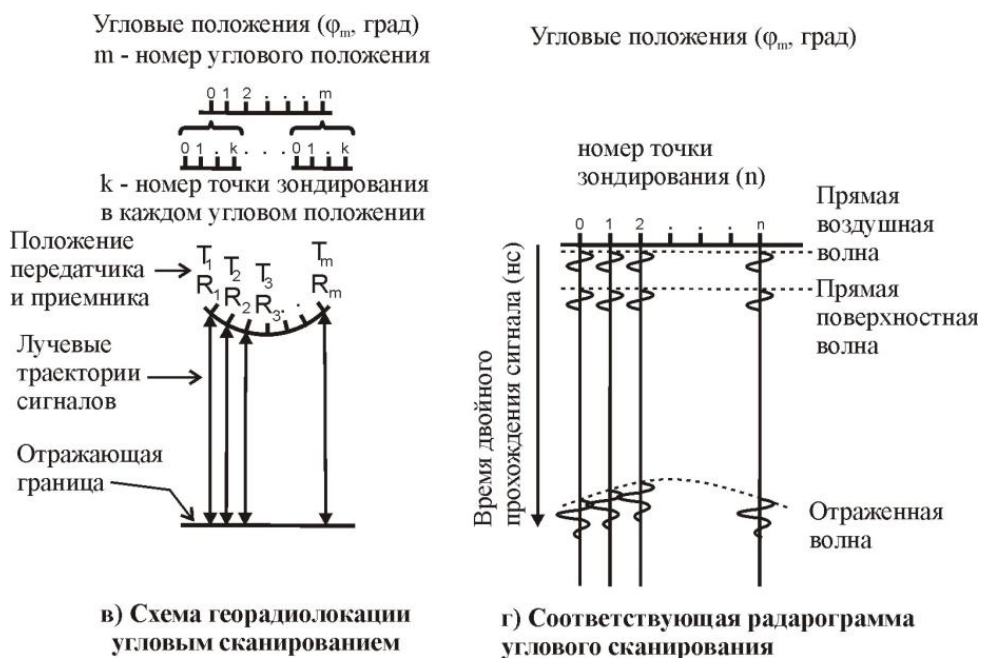


Рисунок 2.2 - Схема формирования волновой картины при изменении угловых положений антенного блока георадара

## 2.2 Формирование волновой картины и технические средства реализации углового георадиолокационного сканирования

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 зондирований изменяются. Для примера на рисунке 2.3 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 [59]. Их регистрация в различных угловых положениях обеспечивается широкой диаграммой направленности экранированных антенн типа «бабочка» (Рисунок 2.4) [61, 22]. 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 [59, 22]. В схемах маленькими стрелками указаны направления падающей и отраженной волны по нормали к отражающей поверхности, т.к. эти волны будут достигать приемника, а остальные рассеются и поэтому не рассматриваются [61].

Как видно на рисунке 2.3а, горизонтальная граница при двухслойном разрезе формирует волновую картину, состоящую из слегка изогнутой оси синфазности отраженных сигналов. Ее искажение на временном разрезе составит не более  $\Delta t$  (для антенны 250МГц георадара «ОКО-2»,  $\Delta t$  составит не более 2,3 нс) и фактически связано с формой углубления, где выполняют угловое сканирование (Рисунок 2.1). Это почти незаметно на радарограмме для горизонтальных геологических границ в естественных условиях с



неидеально ровными контактными поверхностями горных пород и грунтов [61].

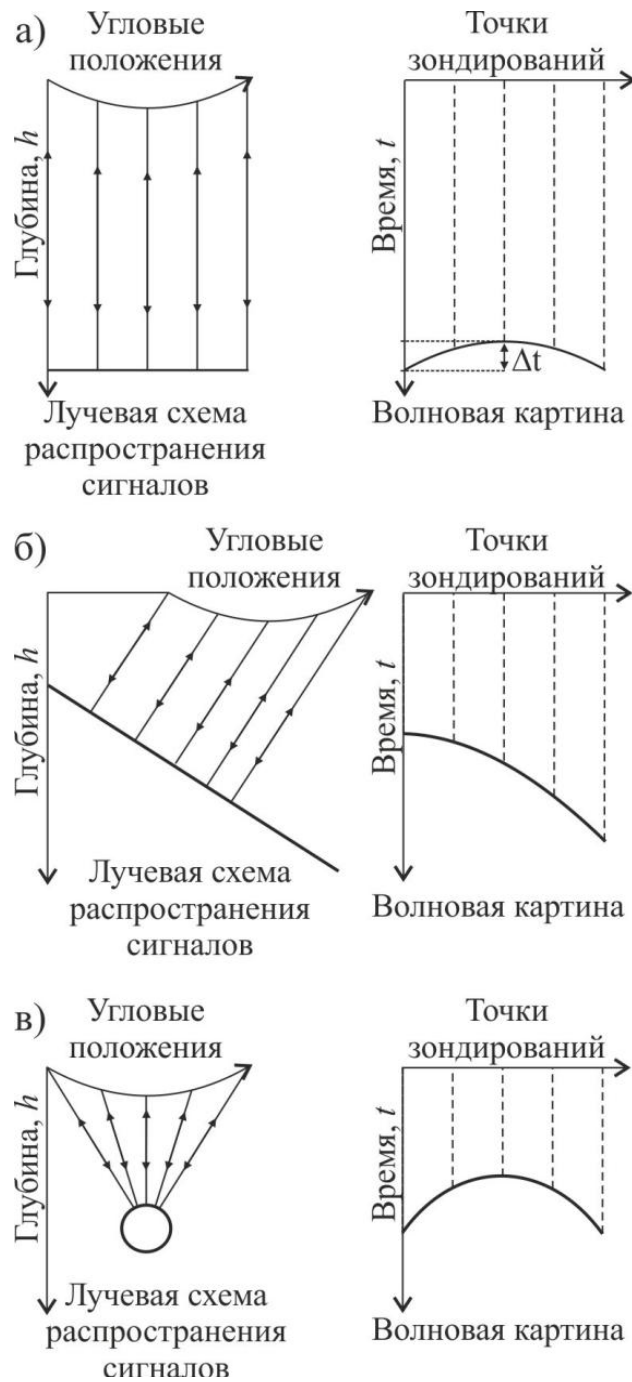


Рисунок 2.3 – Схемы формирования волновой картины для различных геологических разрезов при угловом георадиолокационном сканировании: а) горизонтально-слоистый разрез, б) наклонно-слоистый разрез, в) однородный разрез с включением локального объекта [61]

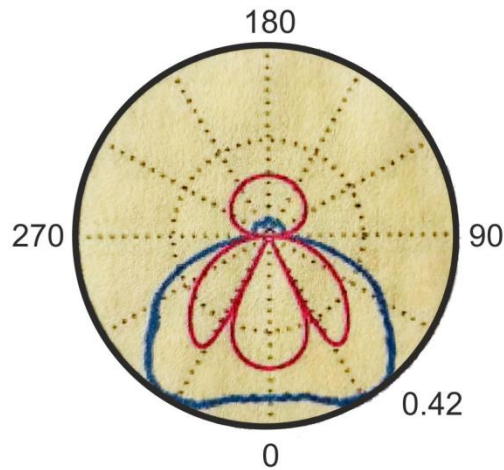


Рисунок 2.4 – Диаграмма направленности экранированных антенн типа «бабочка» [60]

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 (Рисунок 2.3б).

Формирование волновой картины от локального объекта при угловом сканировании схоже с радарограммой профилирования (Рисунок 2.3в). Дифрагированными волнами образуется ось синфазности, схожая с гиперболой, что позволяет различить на радарограмме волновые образы локальных объектов и протяженных отражающих границ между слоями горных пород. Возможно, это является главным преимуществом УГС перед стационарным зондированием, с помощью которого также можно получать локальные данные. Однако во всех трех случаях, приведенных выше (Рисунок 2.3), 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 [61].

Для проведения опытных исследований по разработке методики углового сканирования изготовлена специальная установка, выполненная в

виде треноги, которая оснащена двумя градуировочными шкалами и позволяет перемещать георадар в вертикальной и горизонтальной плоскости. Георадар крепится горизонтально или вертикально в зависимости от решаемой задачи. В конструкции устройства использован серийный георадар «ОКО» с антенным блоком АБ700Р, с центральной частотой 700 МГц и рупорами. Данная модель прибора выбрана не случайно, рупорные формирователи фронта волны позволяют проводить зондирования с воздуха, без контакта с поверхностью исследований. Для лабораторных опытов выбранная частота 700МГц обеспечивает достаточную глубинность исследований. Так, для низкоскоростной среды, например, воды, достаточно 100 нс для 1,5 м глубины исследований (при  $V=30$  м/мкс). Опорная стойка выполнена в виде диэлектрической треноги, оснащена двумя градуировочными шкалами и позволяет перемещать георадар в вертикальной и горизонтальной плоскости [62]. Георадар крепится горизонтально или вертикально в зависимости от выбора плоскости ориентации.

В начале испытаний записан тестовый непрерывный профиль П1. Объект исследований - блочная стена, тестировалась работоспособность всей системы в целом. Записано 189 точек зондирования (т.з.), угол зондирования составил примерно  $180^\circ$ , положение  $90^\circ$  ориентировочно соответствует середине профиля, с минимальным расстоянием до отражающей границы. На рисунке 2.5а представлен фрагмент радарограммы с разверткой по глубине 20 нс. Во временном интервале от 3 до 9 нс наблюдаются сигналы от внешней и обратной поверхности стены. Прослеженные по осям синфазности границы (отражения от поверхностей стен), имеют вид искривленных гипербол с вершиной, соответствующей перпендикулярному положению антенного блока по отношению к стене. Искривленная форма осей синфазности обусловлена неравномерным движением по угловой координате, следовательно, получаемая от объекта исследований информация искажена, и зондирования необходимо провести с равномерным шагом в дискретном режиме. По радиолокационному сигналу в

т.з. 98 определена скорость волн в стене, по заранее известной ее толщине (0,13 м) [62]:

$$V = \frac{2h}{t} = \frac{2 * 0,13}{2,25} = 116 \text{ м / мкс}$$

Так же можно рассчитать вещественную часть диэлектрической проницаемости стены:

$$\varepsilon' = \frac{c^2}{V^2} = \frac{3 * 10^8 \text{ мс}}{116 * 10^6 \text{ мс}} = 6,7$$

Следующий файл П2 был записан дискретно с шагом  $5^\circ$ . Угол зондирования составил  $180^\circ$ , всего 36 точек зондирования (Рисунок 2.5б). Время прихода импульсов от отражающих поверхностей и их амплитуды приведены на сигнале по т.з. 18, соответствующей середине профиля и положению  $90^\circ$ . В этом случае волновая картина получилась симметричная относительно зондирования по нормали. Время распространения волны в исследуемом объекте -  $t=2,25 \text{ нс}$ , с точностью совпало с предыдущим значением. Полученная по этой методике радарограмма более наглядна, в сравнении с радарограммой непрерывного сканирования (Рисунок 2.5а) для анализа волновых образов. При получении искривленных гипербол можно судить о неровных границах раздела сред, таких как, например, прослой в породе [62].

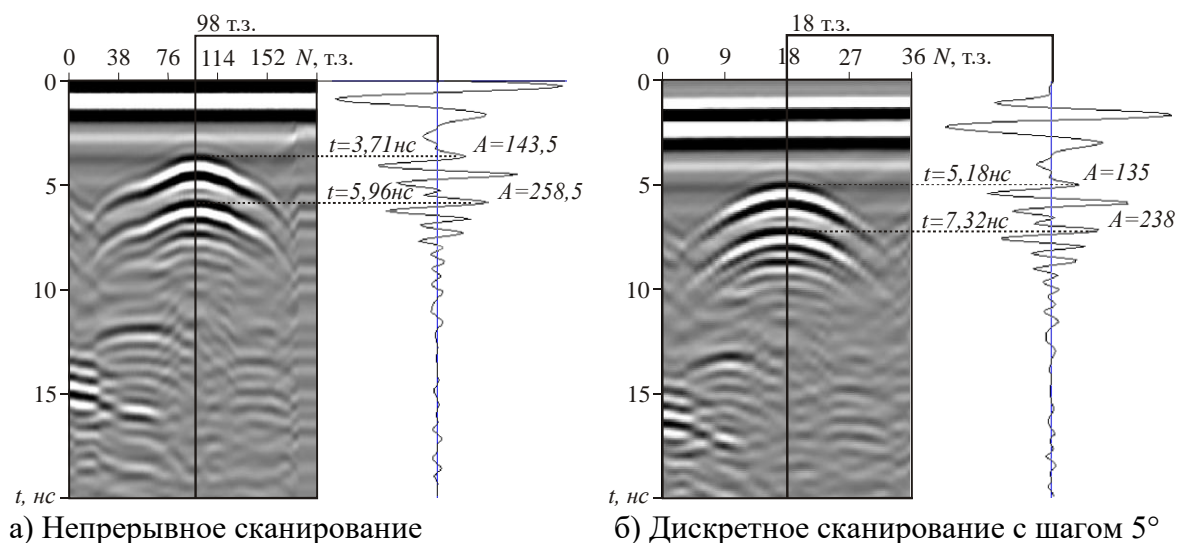


Рисунок 2.5 – Угловое сканирование блочной стены

По результатам опытов установлено, что для получения равномерной последовательности отраженных сигналов, описывающих кривую на радарограмме, от ровной горизонтальной границы, необходимо, обеспечить равномерный шаг зондирования, что достигается использованием градуировочной шкалы на устройстве сканирования при дискретных измерениях [62]. Разумно предположить, что для дальнейшего моделирования углового сканирования в качестве объекта можно использовать однородные среды: воду, песок, что обеспечит контакт антенного блока на границе «воздух-вода», «воздух-песок» для исключения явления преломлений и лишних отражений радиоволн.

На следующем этапе моделирования эксперименты по угловому сканированию осуществлялись в емкости с водой [62]. Вода, в данном случае, представляет собой однородную поглощающую среду, в которой проще анализировать георадиолокационные сигналы, чем на натуральных объектах, и, в то же время, присутствует существенное затухание сигнала [63]. Так, на рисунке 2.6а изображена радарограмма, полученная методикой профилирования над локальным объектом. Она полностью соответствует теоретическим представлениям о предполагаемой форме осей синфазности. Здесь присутствует и горизонтальная отражающая граница – дно емкости, и гиперболический образ от локального объекта. На рисунке 2.6б – радарограмма углового сканирования в секторе  $40^\circ$ . Сигналы от локального объекта и дна емкости слиты в одну последовательность осей синфазности в интервале 45-60 нс. Ниже, на 70-80 нс присутствуют сигналы-помехи от бортов емкости. Антенный блок георадара при сканировании не был зафиксирован на определенной глубине, поэтому оси синфазности имеют слегка искаженную форму, тем не менее, проведенный эксперимент показывает возможности углового сканирования при георадиолокационных исследованиях на участках с ограниченным пространством из одной точки наблюдений [62].

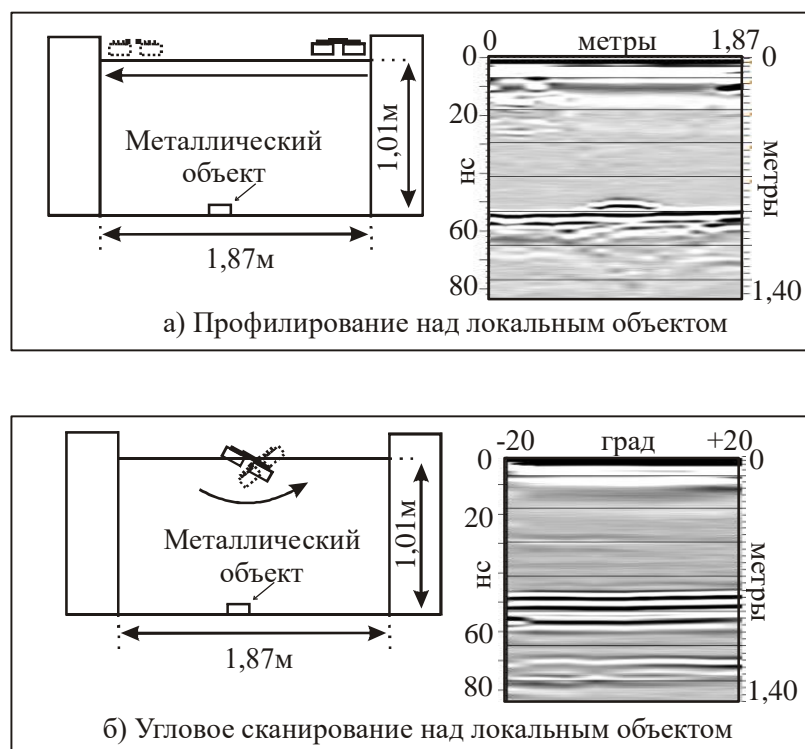


Рисунок 2.6 – Моделирование георадиолокационного профилирования и углового сканирования в емкости с водой

В дальнейшем изготовлен макет устройства для моделирования углового сканирования в воде к антенным блокам (АБ) 400МГц и 700МГц (рисунок 2.7) [62]. Оригинальная конструкция макета удерживает его на поверхности воды, сохраняя горизонтальное положение и постоянную глубину погружения антенного блока. При этом антенный блок имеет возможность вращаться в секторе  $60^\circ$ , с шагом  $5^\circ$ , с фиксацией в каждом угловом положении, благодаря чему, получены радарограммы с осью синфазности сигналов от дна емкости искривленной формы. Также на радарограмме присутствуют сигналы от бортов емкости и от локального объекта, ось синфазности сигналов от которого имеет форму горизонтальной прямой во всем диапазоне углов сканирования, а не только в положениях, близких к нормали. Это показывает, что диаграмма направленности антенны широкая, а отражения волн от локального объекта происходят по закону Снеллиуса (угол падения равен углу отражения) и принципа Ферма

(распространение волны происходит по кратчайшему пути) в пределах раскрытия рупора антенны [22].

Проведенное моделирование подтвердило теоретическую возможность осуществления углового сканирования в геологических средах и получения данных в условиях ограниченного пространства с одного местоположения.



а) Макет устройства для осуществления углового сканирования в секторе 60 градусов в воде георадаром "ОКО" (АБ 700 МГц, рупорный)

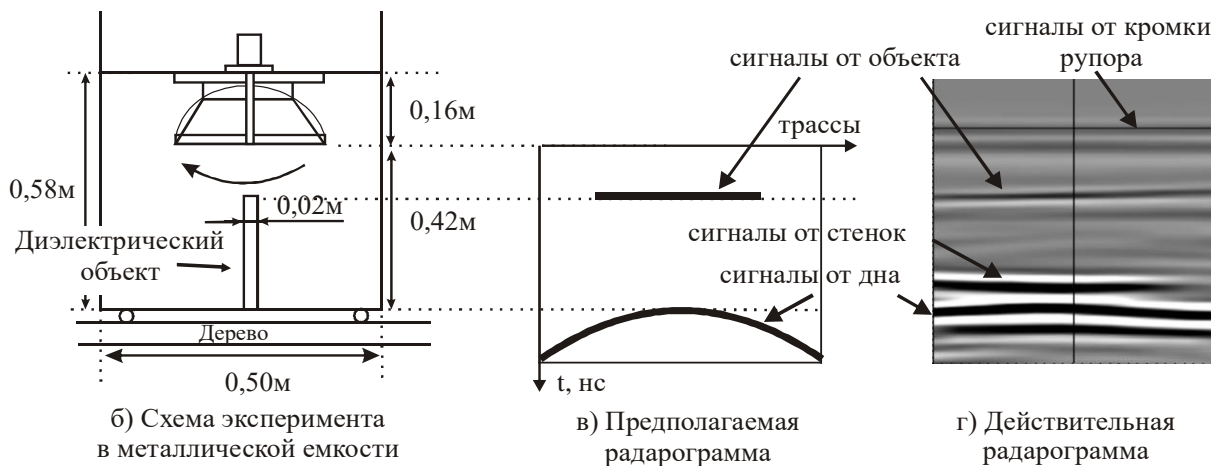


Рисунок 2.7 – Макет устройства для моделирования углового сканирования в воде

### 2.3 Компьютерное и физическое моделирование углового георадиолокационного сканирования

Для выполнения компьютерного моделирования и получения синтетической радарограммы УГС произведен расчет геометрических параметров электрофизической модели горного массива, состоящего из двух слоев: талого (сезонно-талого слоя (СТС)) и мерзлого. Такая модель позволит получить на волновой картине контрастные сигналы за счет различия

электрофизических свойств ее элементов. Расчет положения отражающей границы на глубинном разрезе выполнен на основе геометрических построений для исследований на глубину 3,5 м антенным блоком АБ-250 (250 МГц, база (Rх, Тх) 0, габариты антенны 0,74 x 0,46 x 0,15) в каждом угловом положении (Рисунок 2.8). Талый слой, мощностью 2,9 м, представлен горными породами с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'=7$ , а многолетнемерзлые породы, мощностью 0,6 м, с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'=4$  (Рисунок 2.9а). Числовые значения для моделирования приведены в таблице 2.1.

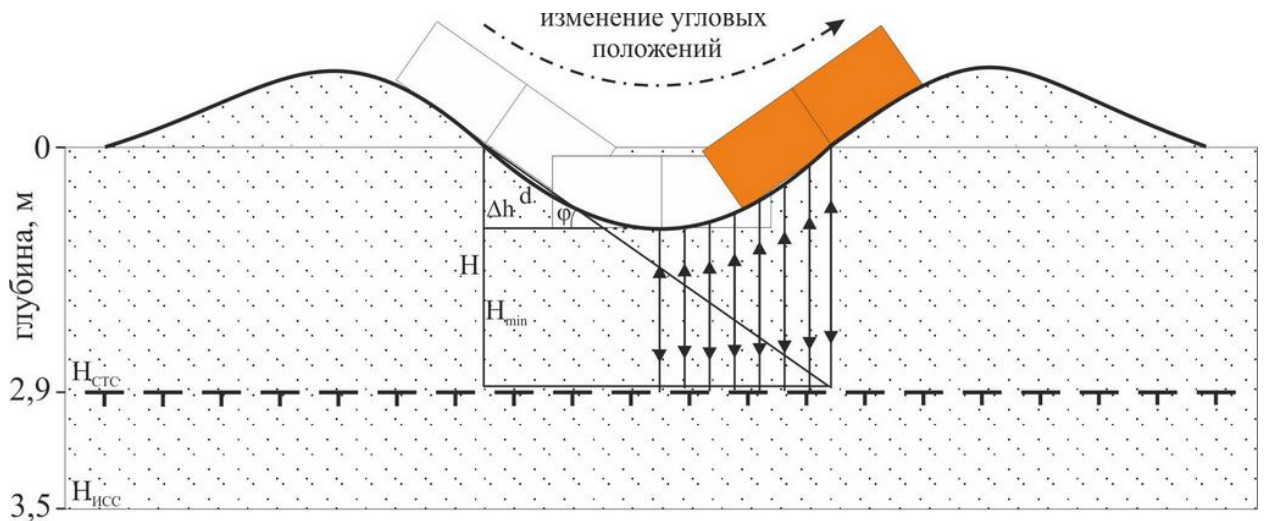


Рисунок 2.8 – Схема УГС двухслойной среды антенным блоком АБ-250М георадара «ОКО-2» для расчета параметров компьютерного моделирования

Таблица 2.1 – Числовые значения для моделирования волновых картин двухслойной среды при исследовании угловым георадиолокационным сканированием

Угловое положение ( $\phi$ ), град	35	30	25	20	15	10	5	0	5	10	15	20	25	30	35
Глубина СТС от поверхности ( $H_{СТС}$ ), м	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Глубина исследований ( $H_{исс}$ ), м	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Половина ширины АБ-250 ( $d$ ), м	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Приращение к минимальной глубине ( $\Delta h$ ), м	0,132	0,115	0,097	0,079	0,059	0,040	0,020	0,000	0,020	0,040	0,059	0,079	0,097	0,115	0,132
Минимальная глубина СТС при УГС ( $H_{min}$ ), м	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768
Глубина до СТС от АБ при УГС ( $H$ ), м	2,9	2,883	2,865	2,847	2,828	2,808	2,788	2,768	2,788	2,808	2,828	2,847	2,865	2,883	2,9



Компьютерное моделирование распространения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в массиве горных пород при угловом сканировании проведено в системе grMax [64]. Синтетическая радарограмма углового сканирования составлена из набора радарограмм каждого углового положения (Рисунок 2.9б). Ось синфазности отраженных волн от горизонтальной отражающей границы имеет изогнутую форму, и ее искажение от прямолинейной связано только с кривизной поверхности сканирования.

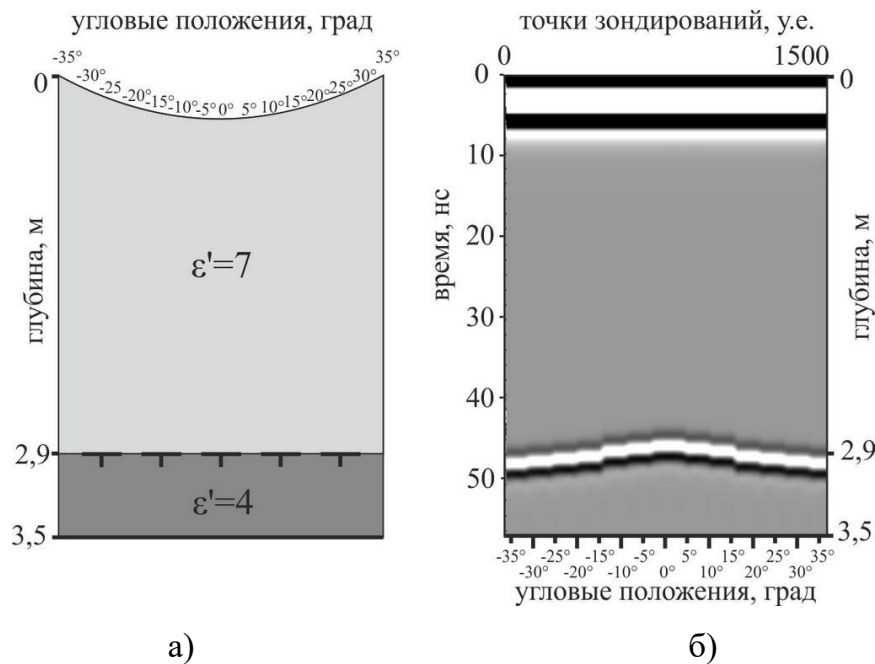


Рисунок 2.9 – Георадиолокационная модель двухслойной среды: а) электрофизическая модель геологического разреза; в) синтетическая радарограмма углового сканирования

Следующая георадиолокационная модель содержит локальный объект в толще талого слоя. Электрофизические параметры объектов модели заданы в виде вещественной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости: талый слой мощностью 2,9 м –  $\epsilon'=7$ , многолетнемерзлые породы мощностью 0,6 м –  $\epsilon'=4$ , локальный объект размером 0,2 м –  $\epsilon'=4$ . Локальный объект расположен в толще сезонно-талого слоя, по центру, относительно поверхности углубления для сканирования. Числовые расчеты выполнены аналогично предыдущей модели для углового сканирования антенным блоком АБ-250М, а также для случая стационарного зондирования

над локальным объектом (Рисунок 2.10). При стационарном зондировании волновая картина представляет собой последовательность горизонтальных осей синфазности (Рисунок 2.10а). До 10 нс прослежены сигналы прямого прохождения (зондирующие), в интервале 20-26 нс – сигналы от локального объекта, в интервале 51-57 нс – сигналы от границы талые/мерзлые породы. Синтетическая радарограмма углового сканирования составлена из набора радарограмм каждого углового положения (Рисунок 2.10в). Волновой образ локального объекта на ней представлен изогнутой протяженной осью синфазности сигналов во временном диапазоне, примерно 16-24 нс. Ее искажение зависит от формы и глубины залегания локального объекта. Ось синфазности отраженных волн от горизонтальной отражающей границы (44-51 нс) тоже имеет изогнутую форму, и ее искажение от прямолинейной связано только с кривизной поверхности сканирования.

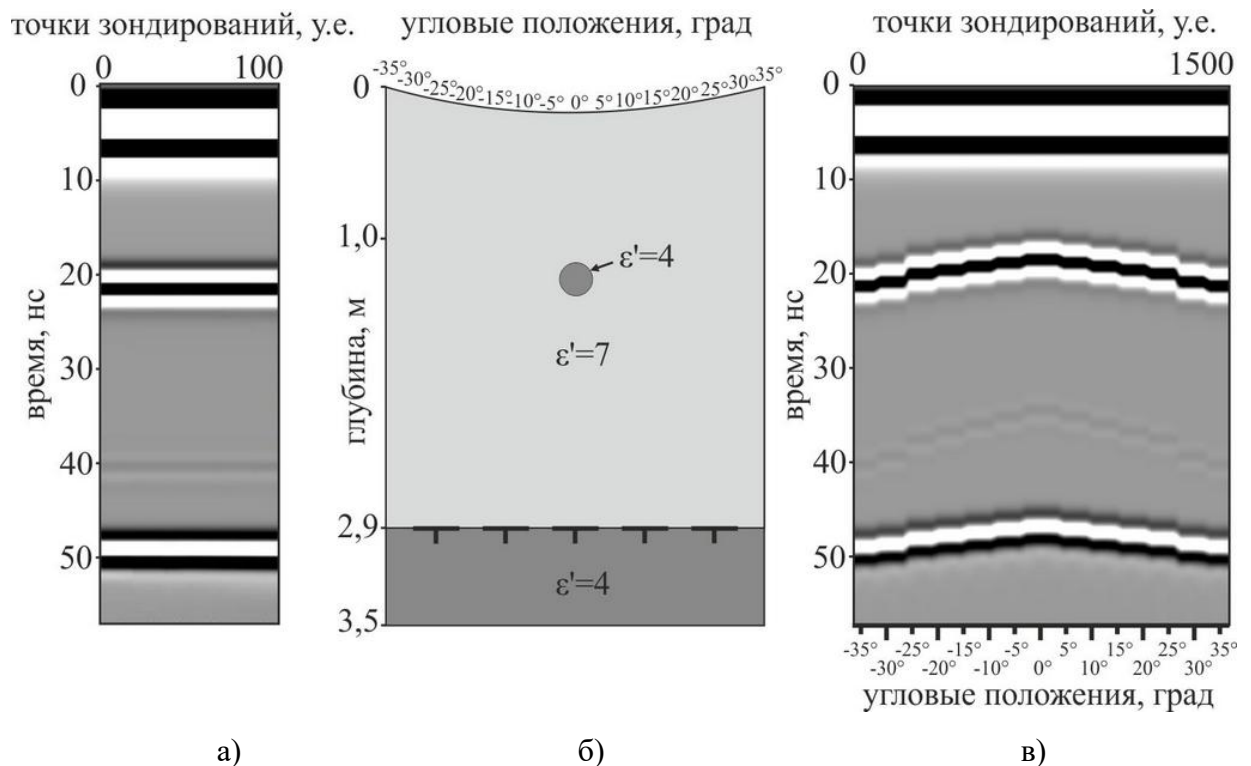


Рисунок 2.10 – Георадиолокационная модель горизонтальной отражающей границы и локальной неоднородности: а) радарограмма стационарного зондирования из центра углубления (положение антенного блока 0°); б) электрофизическая модель геологического разреза; в) синтетическая радарограмма углового сканирования

Для определения параметров углового сканирования проведено физическое моделирование в диэлектрической емкости с объемом залитой воды 85 л, от поверхности воды до дна емкости: 0,3 м (Рисунок 2.11а.). Антенный блок 700 МГц погружался на глубину 0,15 м, для обеспечения постоянного контакта с водой при различных углах сканирования. Передатчик расположен напротив приемника, на дне емкости на расстоянии 0,15 м. В соответствии с выражением [54]:

$$\lambda = \frac{\lambda_c}{\sqrt{\epsilon'}}$$

где  $\lambda_c$  – длина волны в вакууме,  $\epsilon'$  – диэлектрическая проницаемость в среде,  $\lambda$  – длина волны в среде.  $\lambda_c$  – определяется по выражению [54]:

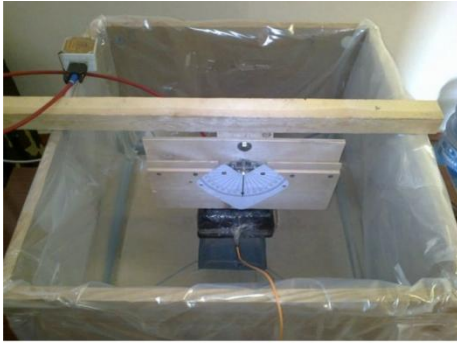
$$\lambda_c = c/f_c$$

где  $f_c$  – центральная частота антенны в вакууме.

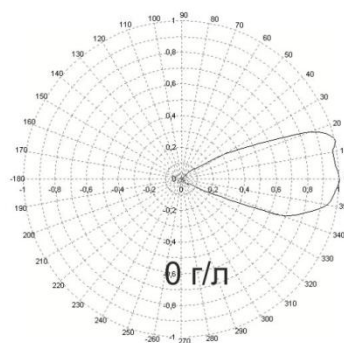
Для антенны 700 МГц  $\lambda_c$  - составит 0,43м, а в воде ( $\epsilon'=81$ )  $\lambda_{\text{вода}}=0,05$  м.

Таким образом, в модели обеспечивается необходимое расстояние для исследований в дальней зоне, превышающее  $2\lambda$ , где распространение волн описывается законами геометрической оптики [59, 65].

Минерализация воды в процессе измерений изменялась в пределах  $0 \div 5,35$  г/л, что позволило изменять электрофизические свойства [66, 67] для имитации затухания сигналов в различных горных породах. Регистрировались два информационных параметра: временная задержка георадиолокационного сигнала прямого прохождения и его амплитуда. Измерения амплитуд сигналов на определенных углах зондирования позволили построить диаграммы направленности антенн георадаров в водной среде с различной проводимостью, изменение которой достигалось посредством повышения минерализации раствора. В результате установлен эффект сужения диаграмм направленности антенн при увеличении проводимости раствора (Рисунок 2.11б.).



а)



б)

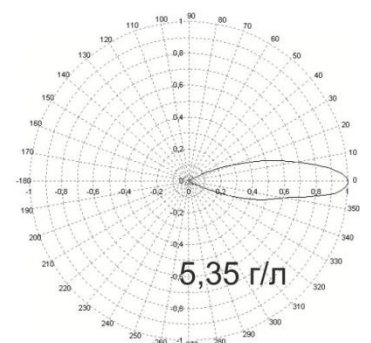


Рисунок 2.11 – Физическое моделирование процесса формирования диаграммы направленности антенн георадара в водном растворе NaCl при различной минерализации:

а) – устройство углового сканирования на базе георадара «ОКО» (700 МГц);

б) – диаграммы направленности антенного блока 700 МГц

Такой же эффект сужения диаграммы направленности наблюдается при увеличении значений диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) [3]. На рисунке 2.12 представлены результаты наблюдений для электрического диполя, расположенного на поверхности геологических сред с пятью различными значениями  $\epsilon'$ . Видно, что изменения диаграммы происходят не только по ширине, но и по глубине.

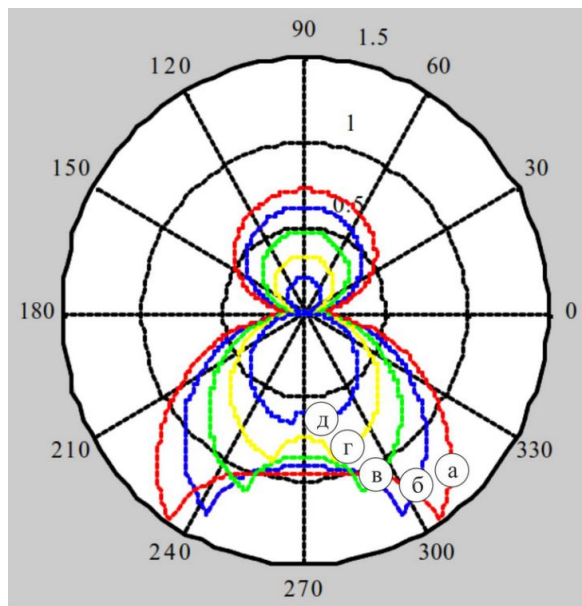


Рисунок 2.12 – Изменение диаграммы направленности антенны (в ТЕ плоскости) для электрического диполя на поверхностях геологических сред с различной диэлектрической проницаемостью [3]: а – 3,2; б – 5,0; в – 10; г – 25; д – 81

Регистрация временной задержки георадиолокационного сигнала прямого прохождения в процессе моделирования (Рисунок 2.13а), позволила построить графики ее зависимости от угла зондирования при различных значениях минерализации т.е. представить оси синфазности сигналов в графическом виде для сравнения (Рисунок 2.13б). Из графиков видно, что наклон осей синфазности сохраняется практически неизменным.

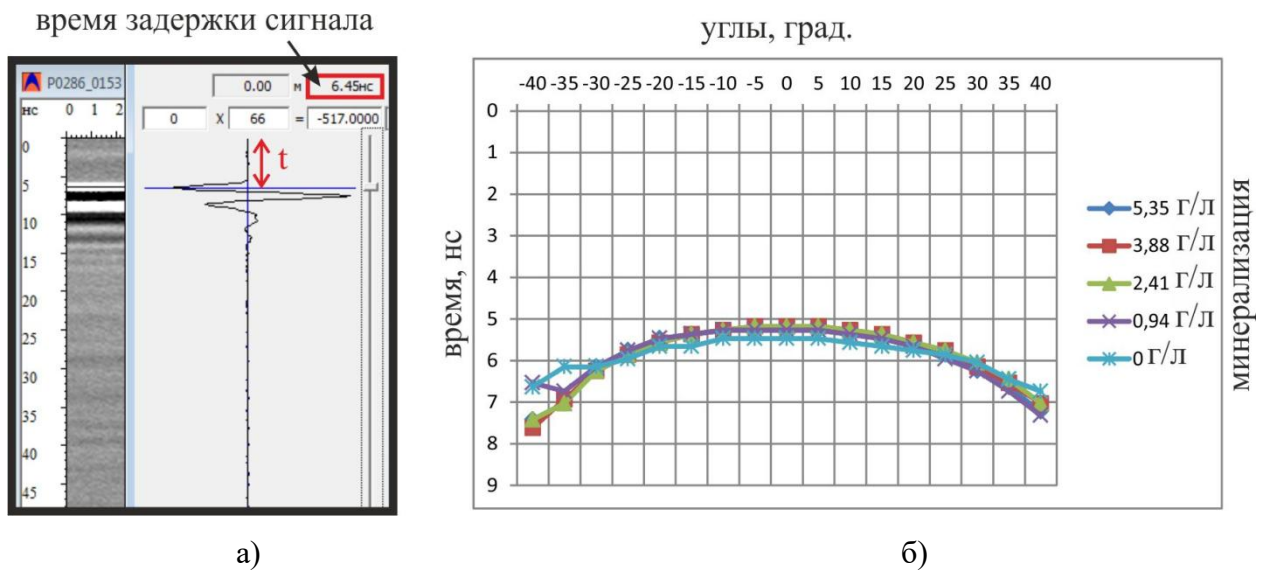


Рисунок 2.13 – Сопоставление временных задержек сигнала в зависимости от минерализации воды при просвечивании под различными углами: а) – определение времени задержки сигнала; б) Зависимость времени прихода сигнала от угла сканирования при различных значениях минерализации воды

По построенным графикам зависимости амплитуд от углов сканирования (Рисунок 2.14) установлено, что существенное уменьшение значений амплитуд сигналов происходит после превышения углов  $30-35^\circ$ , что определяет предел углового сканирования –  $\pm 35^\circ$  от нормали.

После положительных результатов компьютерного и физического моделирования в воде, можно перейти к моделированию УГС на реальных горных породах. Для этого в лабораторных условиях выполнено моделирование в емкости с песком мелкой фракции, а результаты УГС сопоставлены с данными стационарного зондирования в одной точке. (Рисунок 2.15).

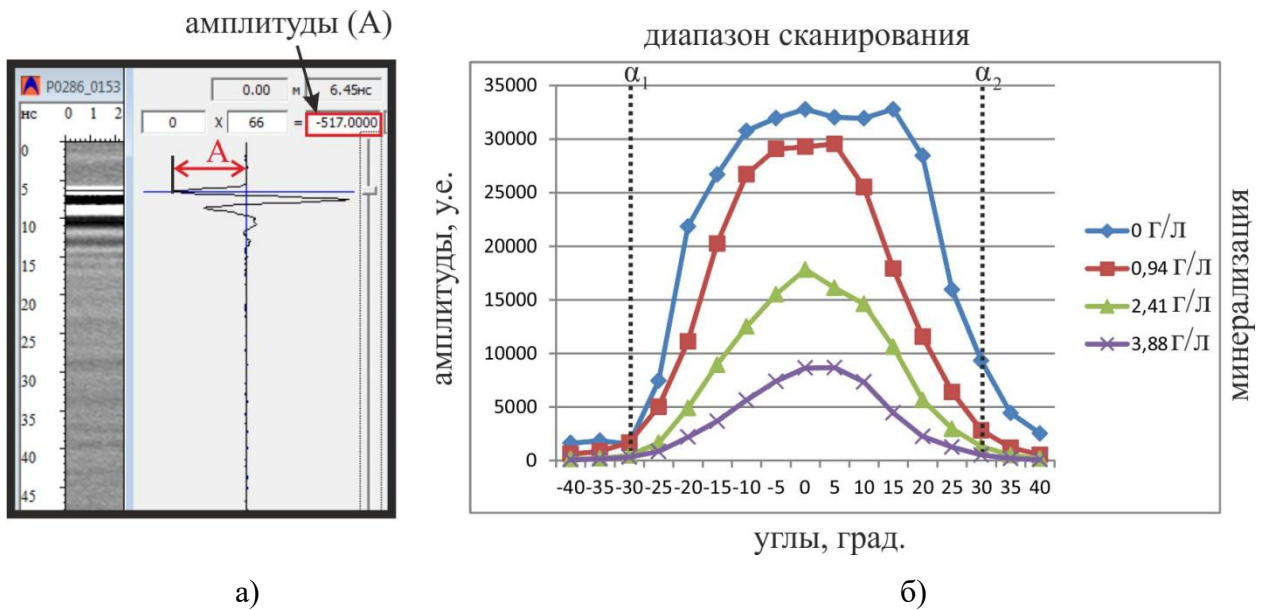


Рисунок 2.14 – Определение предельных значений углов сканирования:

а) - определение амплитуды сигнала; б) - зависимость амплитуды сигнала от угла зондирования при различных значениях минерализации воды



Рисунок 2.15 – Физическое моделирование в емкости с песком

Для сканирования использован антенный блок 700 МГц георадара «ОКО». Отчетливо видно, что радарограмма углового сканирования более информативна в сравнении со стационарной и упрощает интерпретацию

радарограмм (Рисунок 2.16). Это достигается регистрацией единичных отражений от случайных помех как отдельных сигналов (либо их ограниченной последовательности), а регулярных отражений в виде протяженной оси синфазности (Рисунок 2.16б), в то время как при стационарном зондировании даже единичные отражения формируют протяженные оси синфазности, тем самым затрудняют интерпретацию данных радиолокации (Рисунок 2.16а). Так, в данном случае, сигналы-помехи (отражения от бортов емкости) на рисунке 2.16а имеют постоянное время регистрации в процессе записи радарограммы, маскируя полезный сигнал (отражение от дна емкости). При угловом сканировании (Рисунок 2.16б) сигналы-помехи расходятся по времени регистрации, тем самым появляется возможность выделить протяженную ось синфазности сигналов во временном окне от 5,25 до 8 нс, соответствующую искомой отражающей границе [68].

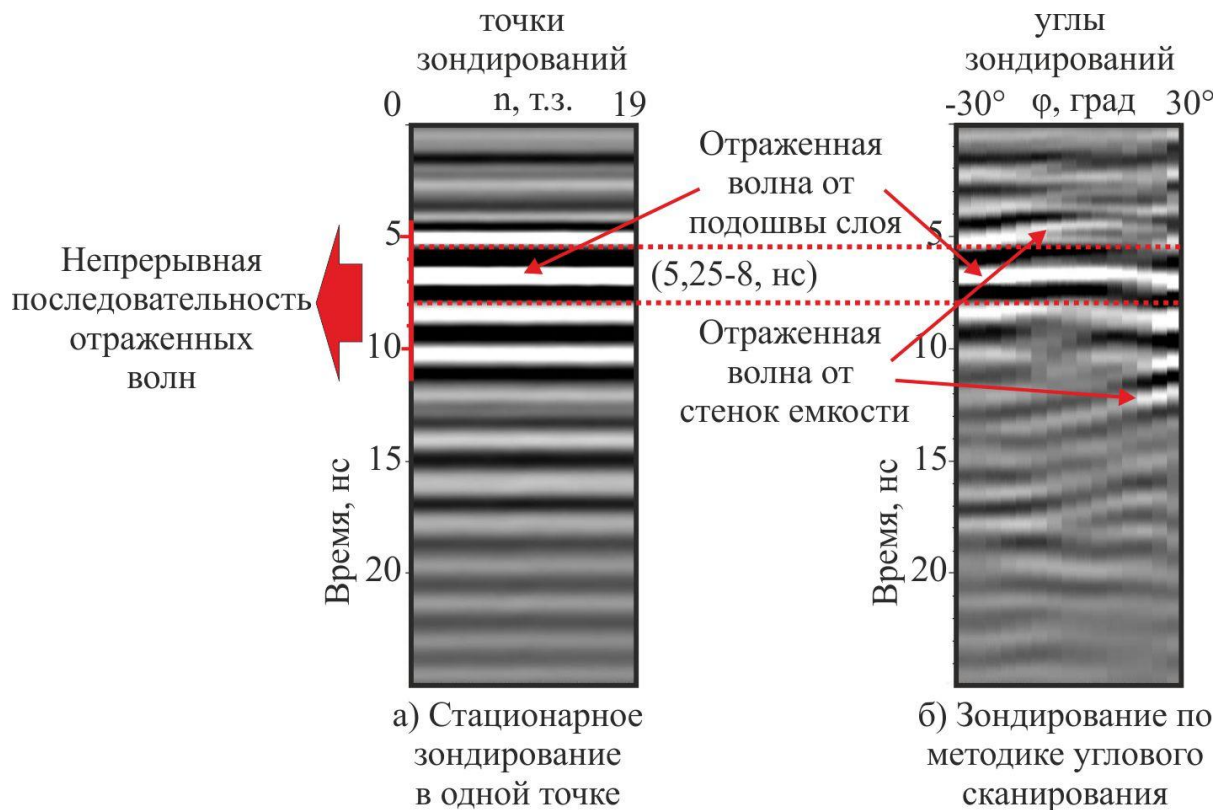


Рисунок 2.16 – Сопоставление данных георадиолокации песка мелкой фракции: а – при стационарном зондировании в одной точке; б – при угловом сканировании из одного местоположения

Возможность выявления отражающей границы раздела сред с помощью УГС позволяет определять свойства горных пород, а именно значение диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ), из одного местоположения в условиях ограниченного для профилирования пространства, аналогично способу их определения в методиках профилирования и зондирования при известной дальности до отражающей границы, либо объекта. При моделировании в емкости с песком мощность слоя составила 0,4 м, что по данным углового сканирования соответствует времени задержки сигнала – 6,64 нс. Тогда, после расчетов по выражениям [15]:

$$v = \frac{2h}{t}$$

и

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$$

где  $v$ - скорость распространения волны в песке,  $h$ - мощность слоя песка,  $t$  – задержка времени,  $c$ - скорость света. Получаем, что  $\epsilon'$  песка на момент эксперимента составила 6,3. Тогда длина волны в песке составит [15]:

$$\lambda = \frac{\lambda_c}{\sqrt{\epsilon'}} = \frac{0,43}{\sqrt{6,3}} = 0,17$$

Таким образом, в модели обеспечивается необходимая толщина слоя песка для исследований в дальней зоне, превышающая  $2\lambda$ , где распространение волн описывается законами геометрической оптики [59, 65].

Физическое моделирование в емкости с песком показало, что при угловом сканировании происходит накопление отраженных сигналов от исследуемой горизонтальной границы [57]. В результате накопления данных зондированиями из одного местоположения интенсивность регулярных сигналов на радарограмме возрастает, а непостоянные сигналы-помехи распределяются по временной области, теряя свою интенсивность, за счет этого повышается точность и достоверность исследований.



## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований предложен способ записи данных георадиолокации из одного местоположения под различными углами антенного блока, который обеспечивает увеличение плотности уникальных точек зондирования. Сканирование осуществляется с учетом угловых положений антенного блока георадара. При этом, как показали результаты экспериментов компьютерного и физического моделирования, угловое георадиолокационное сканирование позволит получать дополнительную локальную информацию для изучения строения и состояния массива горных пород в недоступных для профилирования местах.

По результатам физического моделирования массива горных пород в лабораторных условиях обоснованы параметры углового георадиолокационного сканирования: предельные углы сканирования до 35 градусов, шаг сканирования - равномерный, количество трасс в каждом угловом положении - одинаковое, при этом количество трасс должно обеспечить визуальное восприятие волновой картины, режим записи – непрерывный, отдельными файлами в каждом угловом положении; обработка выполняется радарограммы, собранной из отдельных файлов различных угловых положений. Отмечены преимущества углового сканирования при сопоставлении с данными стационарных наблюдений. Подготовлено оригинальное запатентованное устройство для углового сканирования к антенным блокам 400 и 700 МГц георадара «ОКО», позволяющие осуществлять сканирование в секторе 70°. Отмечена возможность определения значения диэлектрической проницаемости по данным углового сканирования при известной мощности слоя. Предполагается, что данный способ найдет свое применение при проведении контактных георадиолокационных исследований в подземных горных выработках, на участках открытых горных работ с ограниченным пространством и там, где получение данных методикой профилирования невозможно.

3 Георадиолокационное картирование структурных особенностей массивов горных пород месторождений криолитозоны в условиях пересеченной местности и ограниченного пространства

3.1. Разработка методики углового георадиолокационного сканирования массива горных пород

В случаях, когда осуществление контактных измерений с непрерывным перемещением антенного блока георадара невозможно, применяют дополнительные устройства и механизмы для его перемещения в отрыве от исследуемой поверхности, либо делают контактные дискретные зондирования в отдельных точках. В свою очередь, отсутствие контакта антенного блока с поверхностью исследуемых пород ведет к появлению сигналов-помех от окружающих объектов, а дискретные измерения накапливают стационарные сигналы-помехи. Таким образом, и при выполнении углового сканирования необходимо обеспечить максимальный контакт антенного блока с исследуемой поверхностью для исключения негативных явлений.

Для выполнения георадиолокации методикой углового сканирования на действующих месторождениях антенный блок георадара был доработан. Основываясь на ранее сконструированных макетах, для лабораторных экспериментов, была поставлена задача разработки антенного блока, позволяющего осуществлять его развороты в вертикальной плоскости с измерением углов разворота в градусах и сохраняющим контакт с зондируемой поверхностью горных пород. При этом, заводская конструкция антенного блока должна быть подвергнута минимальным изменениям, а доработка максимально простой и не требующей затрат на электропитание.

В результате разработан антенный блок георадара, состоящий из корпуса 1, к которому прикреплена вертикальная пластина 2 со шкалой градусов 3 и стрелкой-отвесом 4 (рисунок 3.1). Его конструкция является

оригинальной и запатентована (Патент № 141971 Российская Федерация, МПК G01S 13/88) [58].

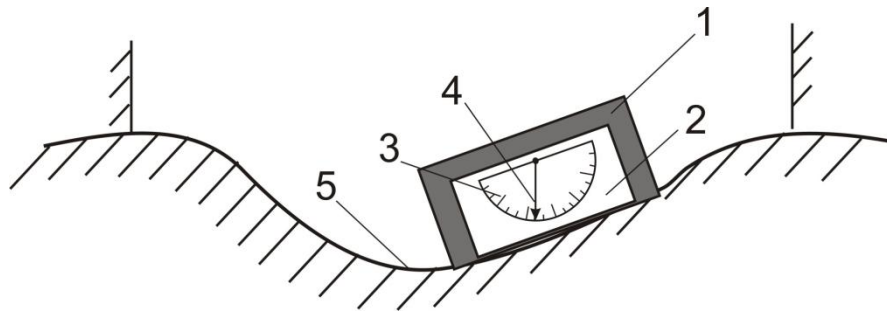


Рисунок 3.1 – Антенный блок георадара для углового сканирования:

1 – корпус; 2 – вертикальная пластина; 3 – шкала в градусах; 4 – стрелка-отвес; 5 – исследуемые горные породы

Техника проведения углового сканирования подразумевает осуществление зондирований из одного местоположения на рабочем участке в минимальном секторе  $60^\circ$  (оптимально  $70^\circ$ ). При этом георадар размещается продольно своей оси либо на цилиндрической насыпи, либо в цилиндрическом углублении, размер которого сопоставим с размерами антенного блока [55, 57]. В таком случае, на радарограмме отображается изогнутая ось синфазности от горизонтальной границы, по которой, при необходимости, определяется диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$  пород при известной толщине выявленного слоя. Изгиб оси синфазности зависит от того как проводится зондирование, и предпочтительнее сканирование осуществлять из цилиндрического углубления, т.к. при этом минимальное расстояние до отражающей границы будет по нормали к поверхности, а по остальным направлениям увеличиваться с увеличением угла сканирования.

В результате отраженные сигналы сформируют более изогнутый вид оси синфазности, чем при сканировании с насыпи. Это позволит в большей степени разделить полезные сигналы от стационарных сигналов – помех.

Помимо этого, дополнительными преимуществами данного способа являются:

- возможность расширения области зондирования при георадиолокации из одного локального местоположения за счет подготовки полуцилиндрического углубления;

- обеспечение контакта антенного блока с поверхностью горных пород в процессе зондирования, что исключает появление на радарограмме сигналов-помех от окружающих объектов;

- возможность выделить оси синфазности сигналов от искомым объектов;

- возможность оценить фазу и время регистрации сигнала.

Одним из условий реализации углового георадиолокационного сканирования является возможность подготовки углубления в горных породах под антенный блок. Опыт проведения полевых работ показал, что на россыпных месторождениях криолитозоны, даже зимой бывает возможность подготовить такое углубление. Для исследований используется моноблочная антенна АБ-250М, с центральной частотой 250 МГц, георадара «ОКО-2», оснащенная шкалой и стрелкой-отвесом для регистрации угловых положений. Как уже показано выше, возможная глубина зондирования им составляет 8 м. Этой глубины достаточно для решения широкого круга задач определения криогенного состояния массива, а также для изучения его строения.

Для выполнения углового сканирования необходимо определиться с параметрами зондирования и используемой аппаратурой. Проведенное моделирование по формированию диаграммы направленности в воде и минерализованном растворе, показало, что в более проводящих средах диаграмма сужается. При этом можно отметить, что в пресной воде раскрыв диаграммы направленности находится в пределах 40 градусов, в минерализованной в пределах 20 градусов, а пределы углов сканирования ограничены сектором 60-70°. На основе этих значений необходимо

определился с шагом зондирований, при этом он должен быть равномерным. Для повышения количества уникальных трасс в сборной (синтезированной) радарограмме рационально было бы определить легко отсчитываемый и выставляемый в полевых условиях шаг – 5 градусов. Однако столь малое количество трасс (а это 13-15 трасс в секторе 60-70°) визуально трудно воспринимается для обработки. Поэтому рекомендуется в каждом угловом положении осуществлять запись не одной трассы, а их набора. Это увеличит общую плотность измерений, не затратив при этом сколько-нибудь значительного времени, т.к. современные георадары способны вести быструю непрерывную запись.

При обработке экспериментальных данных по угловому сканированию установлено, что дискретная запись (режим «по шагам») в определенных углах сканирования в один файл допускает ошибки в виде пропуска отдельных трасс зондирований из-за несовершенства программного обеспечения и аппаратуры, ошибки могут возникнуть также и по вине оператора. В результате, можно получить радарограмму с точками зондирований, не соответствующими конкретным углам. Поэтому рекомендуется непрерывный режим записи георадиолокационных данных отдельными файлами в каждой точке углового сканирования, с заданием одинакового количества трасс, с дальнейшим объединением их в один файл радарограммы для последующей обработки. Для удобства оператора и облегчения контроля количества записанных трасс, предлагается в каждом угловом положении выполнять запись 100 точек зондирований. По мнению Нерадовского Л.Г., минимально необходимый объем экспериментальной выборки при дискретных измерениях составляет 20-30 трасс сигналов в каждой точке наблюдений, а погрешность измерений при этом не превышает 10-15% [69]. Эти данные были получены им при детальном изучении и проработке методик полевых исследований на густо застроенных городских территориях. Поэтому можно считать, что выбранное количество точек зондирования более чем трехкратно превышает необходимый минимум для

обеспечения достаточной информативности радарограмм при изучении строения и свойств массива и является оптимальным и не ресурсозатратным [69].

Таким образом, по завершению углового георадиолокационного сканирования в 15 угловых положениях из всех файлов, содержащих 100 точек зондирований, в программе обработки GeoScan32 (ООО «ЛогиС») [12], собирается синтезированная радарограмма общей длиной 1500 трасс. Такая плотность измерений улучшает визуальное восприятие радарограммы оператором и позволяет полноценно воспользоваться процедурами обработки стандартного программного обеспечения и успешно провести последующую интерпретацию полученных материалов.

Для автоматизации записи и управления георадаром используется программное обеспечение GeoScan32 [12]. Настройка параметров зондирований георадаром «ОКО-2» с антенной 250 МГц осуществляется на основании имеющейся информации об исследуемых геологических средах:

- *количество точек по глубине – 511* - определяет количество точек по вертикали в принимаемых трассах, чем больше это значение, тем лучше детализация по глубине;

- *количество трасс – 100* – для записи файла в одном угловом положении - 100;

- *накопление сигнала – 32*, этот параметр позволяет увеличить соотношение сигнал/шум и улучшить визуализацию и глубинность исследований;

- *эпсилон* – диэлектрическая проницаемость среды задается значением из исходной геологической информации, например в апреле, когда массив находится в мерзлом состоянии диэлектрическая проницаемость в среднем имеет значение 6. Значение можно изменить при обработке после уточнения данных;

- *развертка (глубина зондирования)* – определяет временной диапазон регистрации данных в приемнике георадара и влияет на максимальную

глубину сканирования. Для антенного блока АБ-250 – 100-200 нс, для АБ-400 – 100 нс, для АБ-700 – 50 нс, для АБ-1200 – 32 нс;

- *число накоплений сигнала – 8-16*, этот параметр позволяет увеличить соотношение сигнал/шум и улучшить визуализацию и глубинность;

- *режим сканирования – «непрерывный»*.

Исходя из описных параметров, подготовлена таблица для различных антенн георадара «ОКО-2», подходящих для изучения строения и состояния многолетнемерзлых массивов месторождений криолитозоны (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Основные параметры сканирования и рекомендуемые значения измерений

Параметры зондирования	Антенные блоки георадара «ОКО-2»			
	АБДЛ-Тритон, 30/50/100, МГц	АБ150, 150 МГц	АБ250, 250 МГц	АБ400 400 МГц
Развертка, нс	400-800	200-400	100-200	100-200
Количество точек по глубине	512			
Накопление сигналов	64	32-64	32-64	32-64
Диэлектрическая проницаемость	В соответствии с горно-геологическими условиями			
Скорость перемещения при профилировании, км/ч	1-5			
Режим измерений	Дискретно/непрерывно	Дискретно/непрерывно/УГС	Дискретно/непрерывно/УГС	Дискретно/непрерывно/УГС
Глубинность, м	25	12	8	5
Разрешение, м	2	0,35	0,25	0,2

Как уже рассматривалось ранее, для сканирования возможно применение георадара в широком спектре частот, однако ограничения касаются геометрических размеров антенных блоков. Малые габариты и экранированный корпус антенного блока обеспечивают возможность его применения на участках горных работ, осложненных присутствием техники и инженерных сооружений, а также подверженных техногенному воздействию. Поэтому наиболее приемлемый диапазон 250-1200 МГц. Широкий спектр частот позволяет получать данные с различной детализацией, разрешающей способностью и глубиной исследований. Современные георадары имеют достаточно компактные антенные блоки,

поэтому вполне возможно применение и антенн с частотой 150 МГц, выполненных в моноблоке.

После настройки параметров записи и подбора антенного блока непосредственная запись данных выполняется на основе запатентованного способа (Пат. №2561769) и поясняется схемой, на которой показано расположение антенного блока георадара в полуцилиндрическом углублении (Рисунок 3.2) [55]. В труднодоступном или ограниченном месте выполняют полуцилиндрическое углубление. Антенный блок устанавливают в одно из крайних положений в углублении горных пород. При этом изъятый грунт по бокам углубления формируется 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 (Рисунок 3.2б). Затем, его перемещают по поверхности углубления, изменяя при этом угловое положение на 5 градусов. В каждом из 15 угловых положений ведется запись в «непрерывном» режиме отдельными файлами длиной 100 трасс зондирований. Сканирование происходит в секторе 70 градусов [61].

Далее осуществляется обработка радарограммы с применением различных процедур (фильтрация, коррекция затухания, регулировка контрастности радарограмм и т.д.), входящих в состав программного обеспечения для георадаров, с целью выделения осей синфазности от отражающей границы. Первичная обработка включает сборку радарограмм углового сканирования из отдельных файлов в одну синтезированную радарограмму общей длиной 1500 трасс. В результате получают радарограмму с набором уникальных трасс сигналов, записанных под различными углами к отражающей горизонтальной границе, что, позволяет выделить регулярные сигналы, тем самым повысить информативность данных георадиолокации [68].



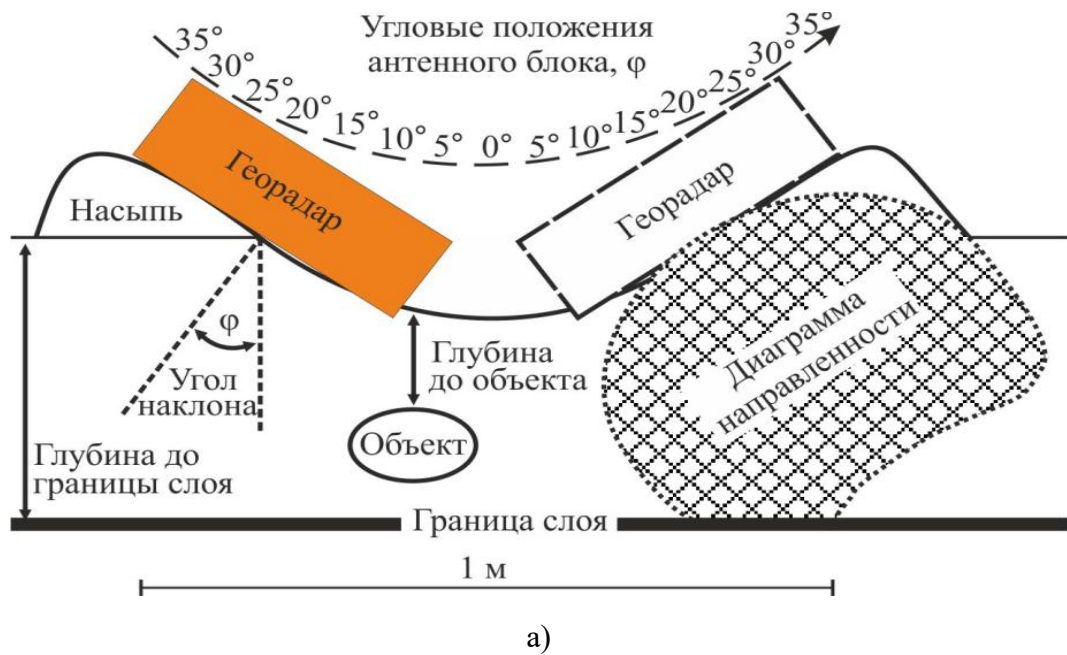


Рисунок 3.2 – Угловое георадиолокационное сканирование:

а) схема выполнения углового георадиолокационного сканирования;

б) доработанный антенный блок георадара «ОКО-2»

Далее осуществляется обработка радарограммы в выбранном временном окне с применением различных процедур с целью выделения осей синфазности от отражающих границ [12]. Основные шаги визуализации и обработки следующие:

- выбор временного окна – с помощью инструмента «визирка» выставляется начало шкалы глубин и обрезается радарограмма сверху и снизу.

- коррекция затухания амплитуд – изменение коэффициента усиления записи - единого множителя для всех отсчетов вдоль трассы (по оси времени) и по профилю (для всех трасс);

- полосовая фильтрация – процедура производится в тех случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном сигнала. В этом случае частотная фильтрация позволяет ослабить помеху и (или) шум, практически без ослабления и искажения сигнала;

- послойная обработка – для выделения отдельных слоев с различными значениями диэлектрической проницаемости для каждого из них;

- интерпретация – поиск и обнаружение осей синфазности приуроченных к геологическим границам, определение физических свойств выявленного слоя горных пород;

- визуализация – окончательную проверку качества обработки выполняет интерпретатор при визуальном анализе георадиолокационных данных. Выполняется корректировка контрастности и цветовая раскраска сигналов. Информация, полученная в результате обработки, представляется в удобной для интерпретации форме [12, 54].

Остальные процедуры обработки могут быть использованы также как и для стандартной радарограммы, если в этом будет необходимость.

### 3.2 Методика площадных исследований на участках месторождений, осложненных пересеченной местностью и ограниченным пространством

Анализ георадиолокационных разрезов россыпного месторождения р. Аллах-Юнь, построенных по результатам проведенных исследований показывает, что наличие обводненных пород и водных объектов существенно влияет на результативность метода георадиолокации. Само месторождение частично отработано в начале XX века и вполне может отрабатываться повторно. Устаревшая документация и техногенный рельеф осложняют

планирование геофизических работ. Так, например, время задержки сигналов от кровли коренных пород на участке русла реки и между дражными ходами намного увеличивается ввиду замедления скорости распространения радиоволн в воде. Специализированные процедуры обработки данных измерений [44] позволяют делать послойные пересчеты скоростей, для повышения точности масштабирования георадиолокационных разрезов по глубине, при этом учитывается влияние рельефа профиля и GPS привязка точек измерений. Экспериментальными исследованиями установлено – ошибки масштабирования георадиолокационных разрезов по известным и расчетным скоростям распространения электромагнитных волн в исследуемых породах не превышают 10%.

В качестве примера георадиолокационного профилирования в условиях пересеченной местности приведены результаты рекогносцировочных работ на месторождении р. Аллах-Юнь. Измерения выполнены ранней весной, когда все породы и мелкие водоемы заморожены, георадаром «ОКО-2» с антенной «Тритон» (50МГц) с целью определения особенностей рельефа плотика. Участок месторождения на этот период отработан, и в связи с этим георадиолокационный профиль проложен по отвалам и по льду между дражными ходами (Рисунок 3.3а), т.е. там, где мощность песков уже изменена. В результате по разрезу выделены: граница залегания коренных пород, в пределах 3-8 м, и замерзшие обводненные участки на отрезках: 50-220м; 280-320 м; 340-420 м (Рисунок 3.3в). Обводненные участки, покрытые льдом, определены на радарограмме по увеличенной временной задержке сигнала, и отсутствию в этом временном интервале отражающих границ, что характерно для электромагнитной волны прошедшей по толще воды.

Как показывают материалы экспериментальных георадиолокационных зондирований на примере отработанного участка драги №147 (р. Аллах-Юнь), проведение измерений методикой профилирования осложняется, если участок большой по площади и имеет изрезанный рельеф (Рисунок 3.3 а, б).

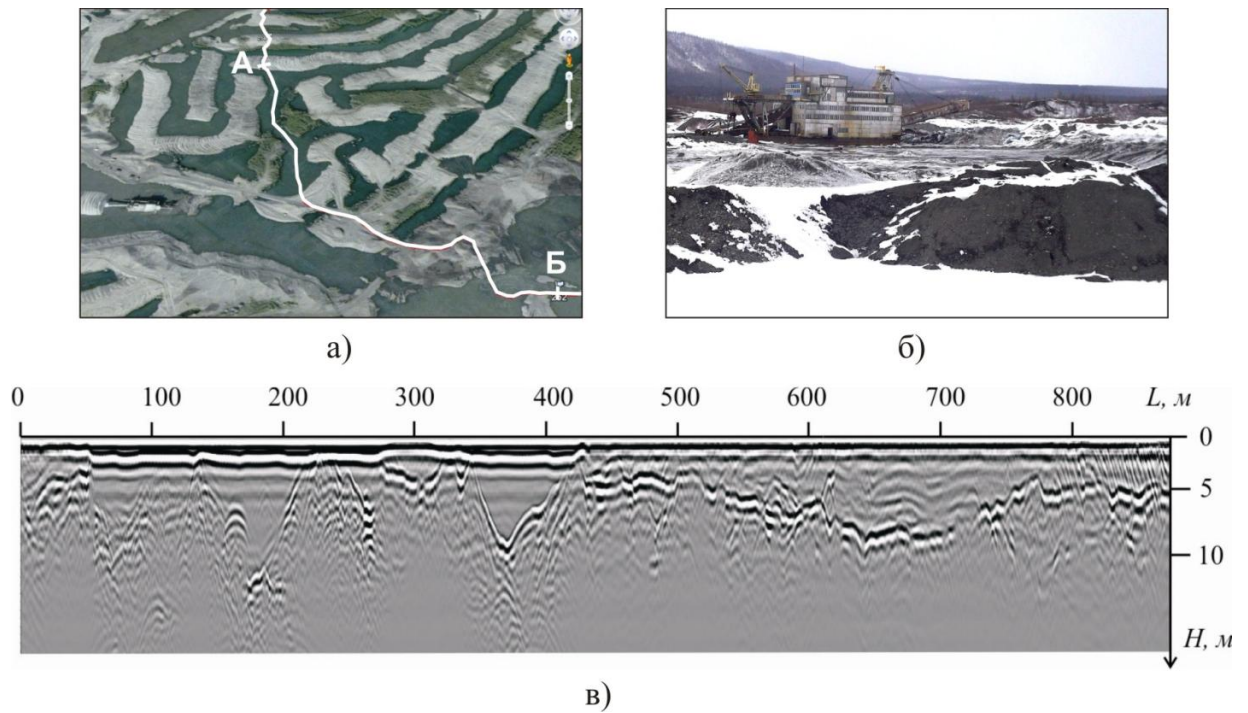


Рисунок 3.3 – Георадиолокационные исследования на участке драги №147:  
 а) А-Б - маршрут георадиолокационного профиля; б) отвалы на участке драги №147; в) георадиолокационный разрез по профилю АБ

При простых условиях залегания плотика и относительно ровной поверхности достаточно применения стандартных методик георадиолокации, предназначенных для идентификации протяженных горно-геологических структур, в основе которых прокладка параллельных профилей. В случаях картирования локальных структурных неоднородностей: зон валунистости, талых зон, подземных льдов и т.п. планируется сеть параллельных и перпендикулярных профилей [22]. Фактически же, в условиях действующих месторождений, а также техногенных (ранее отработанных) проектирование параллельных профилей может быть невозможным. И методика получения полевых материалов должна корректироваться в соответствии с горнотехническими условиями объекта. Полевые работы при этом будут включать в себя два основных этапа – это георадиолокационное профилирование и зондирование в отдельных точках на линии профилей по методике углового георадиолокационного сканирования.

При площадных георадиолокационных исследованиях еще более важным является получение точной и достоверной информации. Для примера можно рассмотреть исследования на территории месторождения россыпного золота «Джекконда» (г. Алдан, Республика Саха (Якутия)) по картированию крупных структурных неоднородностей в коренных породах [70]. Георадиолокационные работы выполнялись на стадии разведки, по участку «Древняя Долина». Данные получены георадаром ОКО-2 с применением антенного блока АБДЛ-Тритон (центральная частота 50 МГц). Участок представляет собой лесной массив с зарослями кустарников с небольшой, частично отработанной территорией. Применение стандартной сетки ортогональных профилей здесь применить невозможно без предварительной подготовки троп. Но это затраты времени и трудовых и финансовых ресурсов, в связи с чем, профили запланированы, по возможности, по существующим дорогам и тропам в лесу (Рисунок 3.4).

По данным георадиолокации выделены зоны крупных структурных изменений коренных пород на глубину более 12 м. (Рисунок 3.4). По карте можно оценить основную зону локализации трещин, разломов и карстовых образований, а также глубину их распространения. Видно, что между профилями геологические структуры интерполированы. Повысить точность картирования возможно дополнением исследований по профилям локальными данными по методике УГС [70].

Для обеспечения достоверности и полноты выделения структурных неоднородностей, исследования проводятся по равномерной сети параллельных профилей или по неравномерной сети профилей с координатной привязкой [71]. А в недоступных для профилирования местах измерения дополняются локальными зондированиями в опорных точках по методике углового георадиолокационного сканирования (Рисунок 3.5) [61, 72, 73]. Точное местоположение каждой трассы в радарограмме имеет решающее значение для получения достоверных площадных построений. Для этого по профилю соблюдают равномерный шаг измерений, а между

профилями сохраняют одинаковую дистанцию [74]. Применение систем спутникового позиционирования по площади картирования с синхронизацией координат данных измерений позволяет располагать профили в произвольном месте с нерегулярным распределением по участку.

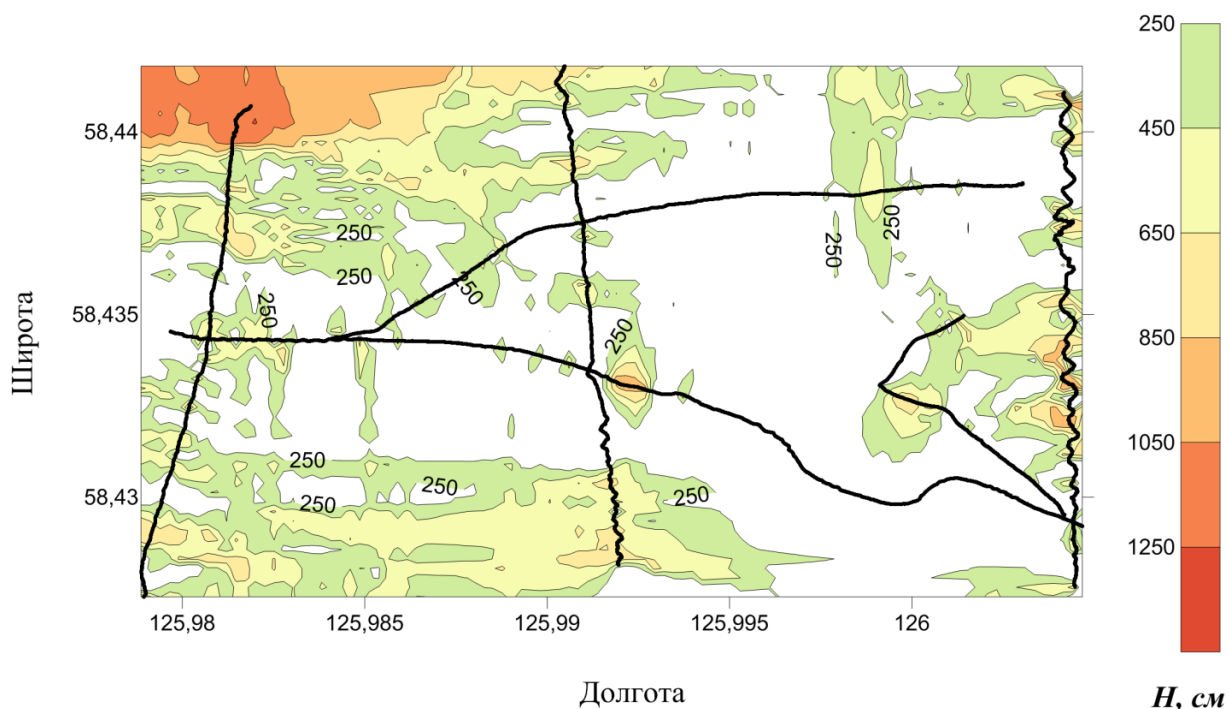


Рисунок 3.4 - Схема профилей и карта распределения крупных структурных изменений в коренных породах на участке «Древняя долина»

Количество и расположение опорных точек определяется поставленной задачей и условиями местности. При необходимости уточнения распространения геологической структуры определяющим будет расположение опорной точки в требуемом месте, нежели попытка сохранить равномерность распределения профилей и опорных точек по участку. На приведенной для примера схеме предложено три опорные точки, задача которых уточнить границы распространения геологической структуры и определить, затрагивает ли она территорию сооружений. 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. Для обеспечения максимально возможной достоверности картирования рационально было бы распределить георадиолокационные данные равномерно по всей площади исследований, чтобы расстояние для интерполяции между опорными точками сохранялось таким же, как и между ближайшими точками зондирования на линиях соседних профилей. Это расстояние может быть определено как отношение ширины исследуемого участка к количеству профилей. При этом основным фактором все же остается физическая возможность выполнения георадиолокационных измерений на местности. В результате, основная задача использования УГС при картировании заключается в обоснованном расположении опорных точек сбора локальной информации.

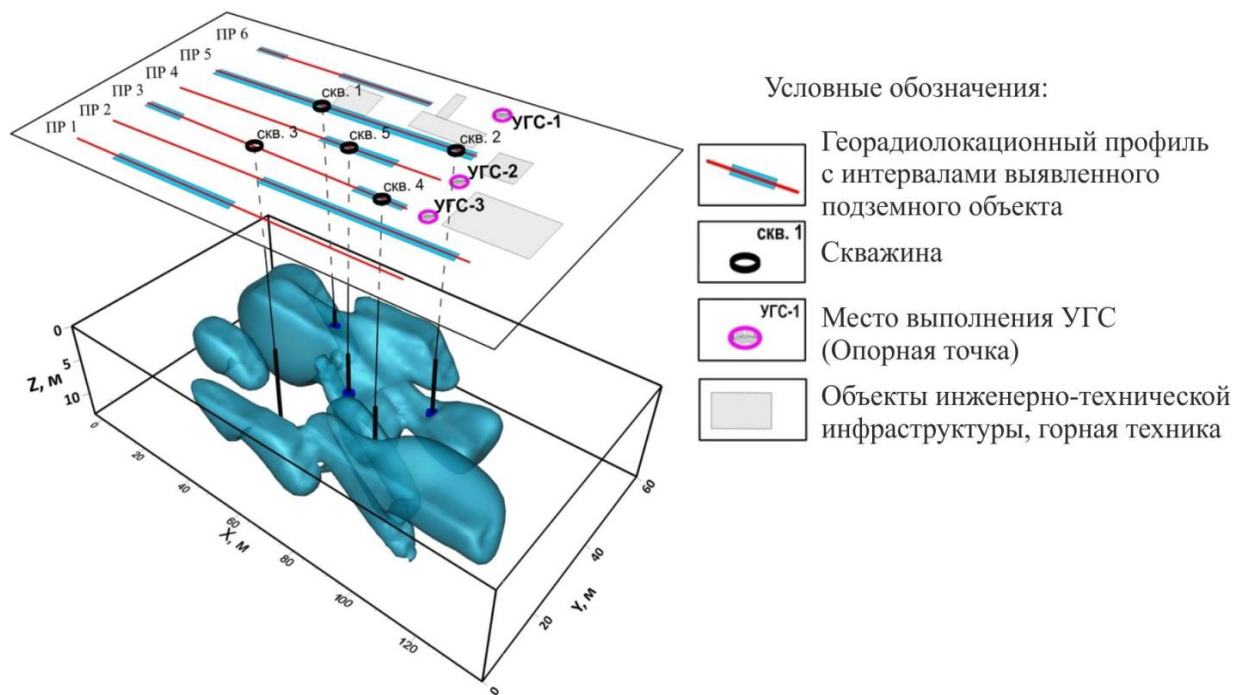


Рисунок 3.5 – Схема георадиолокационного картирования структурных неоднородностей массивов многолетнемёрзлых горных пород с использованием УГС в опорных точках в условиях пересеченной и ограниченной местности, где профилирование невозможно [72, 73]

Таким образом, техника выполнения полевых работ на действующих месторождениях заключается в правильном выборе аппаратуры и методики

георадиолокации, основанном на информации об объекте исследований. Площадные исследования могут включать в себя две основные методики георадиолокационной съемки – это профилирование и дискретное зондирование, которое в свою очередь предполагает измерения в отдельных точках на линии профилей и в межпрофильном пространстве по методике углового георадиолокационного сканирования.

3.3 Последовательность обработки и интерпретация данных георадиолокации. Визуализация результатов изучения строения массива горных пород

На данный момент возможностей стандартного программного обеспечения GeoScan32 (поставляется в комплекте с георадаром «ОКО-2») достаточно для обработки результатов углового сканирования. Первичная обработка включает сборку радарограмм углового сканирования из отдельных файлов и выбор временного окна обработки. Далее осуществляется обработка радарограммы с применением различных процедур с целью выделения осей синфазности от отражающей границы так же, как при профилировании [12, 75]. Результатом обработки данных георадиолокации является синтезированная радарограмма, включающая трассы сигналов непрерывной съемки вдоль профиля и групповые трассы сигналов зондирований на отдельных его участках, где непрерывное перемещение антенного блока невозможно, либо затруднено.

Обработка данных профилирования начинается с масштабирования по протяженности и глубине. Дальнейшая обработка выполняется на основе априорной информации об участке исследований с использованием возможностей доступного программного обеспечения [76, 77]. Так, при обработке данных георадиолокации дражных полигонов можно опираться на электрофизические модели горного массива, выработанные на основе натуральных данных с месторождения р. Аллах-Юнь (Рисунок 3.6).



Георадиолокационные модели позволяют выполнить правильную интерпретацию волновых картин [78, 79].

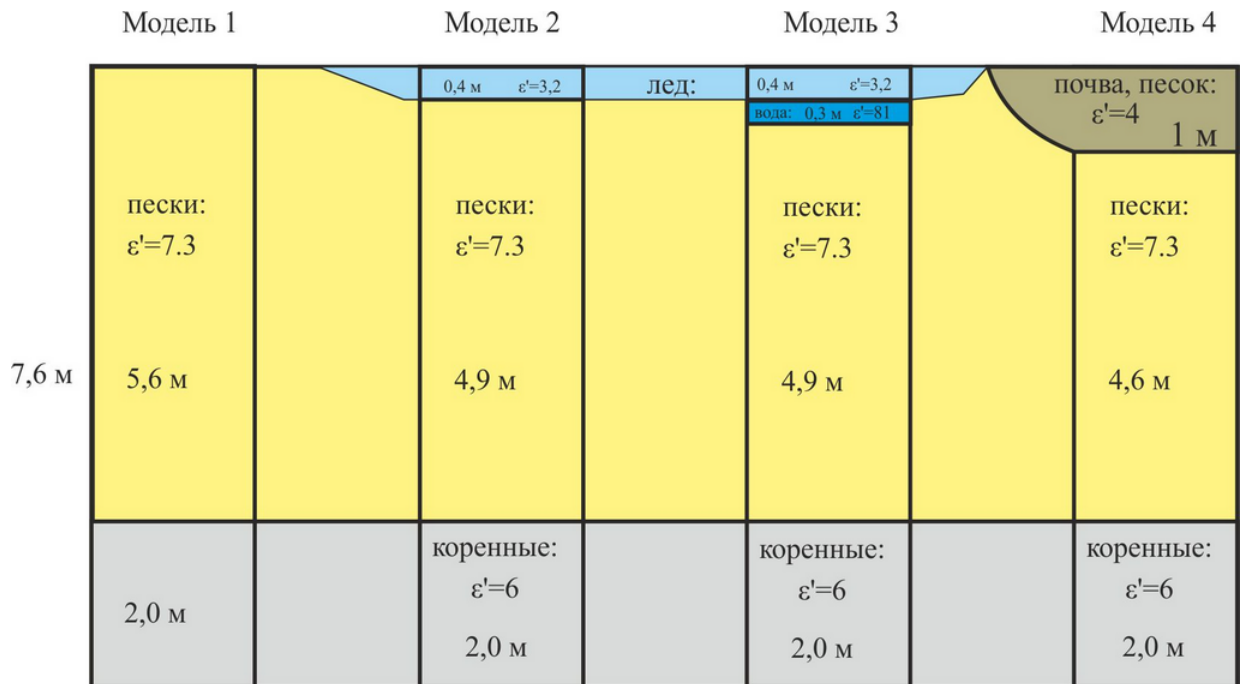


Рисунок 3.6 – Электрофизические модели горного массива дражных полигонов месторождения р. Аллах-Юнь

Расчет глубин по данным георадиолокации проводится на основе значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , определенных по гиперболам от локальных объектов (Рисунок 3.7), по формуле:

$$h = \frac{c \times t}{2 \times \sqrt{\epsilon'}}$$

где  $c$  - скорость света ( $3 \times 10^8 \text{ м/с}$ ),  $t$  - время задержки сигнала,  $\epsilon'$  – вещественная часть диэлектрической проницаемости. Для талых пород  $\epsilon'$  составила 7 (Рисунок 3.7), для мерзлых 4 (Рисунок 3.8) [80].

По полученным результатам можно предположить, что достигнута максимальная глубина исследований (9,5 м) для используемого георадара «ОКО-2» (250 МГц) на этом участке (месторождение золота р. Б.Куранах).

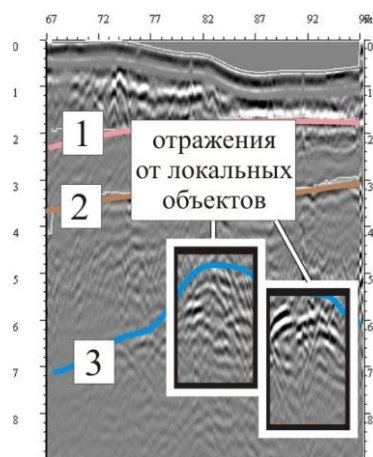


Рисунок 3.7 – Фрагмент радарограммы с локальными объектами для определения диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  в талых породах: 1–слой сезонного промерзания; 2–грунтовые воды; 3 – подошва гале-эфельных отвалов

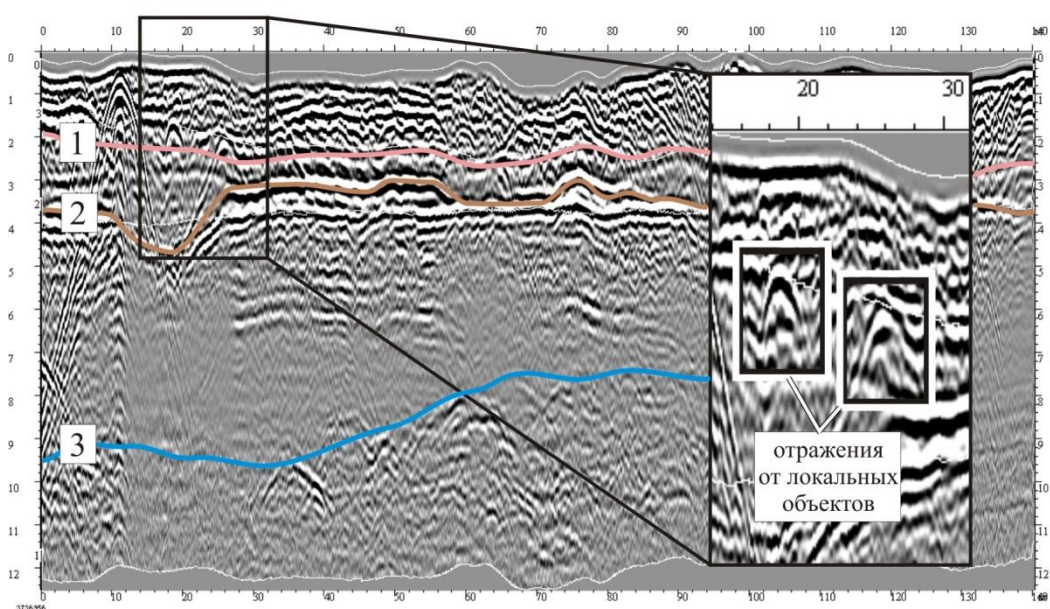


Рисунок 3.8 – Определение диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  в мерзлых породах по отражениям от локальных объектов: 1–слой сезонного промерзания; 2–грунтовые воды; 3 – подошва гале-эфельных отвалов

Примером выявления зон обводнения во вскрышных блоках и интерпретации данных георадиолокации являются материалы исследований на угольном разрезе «Кангаласский» [81, 82, 83]. По рекогносцировочному профилю длиной 160 м, обнаружена зона обводнения. Профиль проложен по расчищенной поверхности вскрышных пород, зондирование проведено георадаром «ОКО-2» (250 МГц). Длина обводненного участка по профилю

составила около 52 м, глубина залегания отмечена в пределах 0,8-1,4 м, при средней скорости по разрезу 0,1 м/нс ( $\epsilon'=9$ ) (Рисунок 3.9).

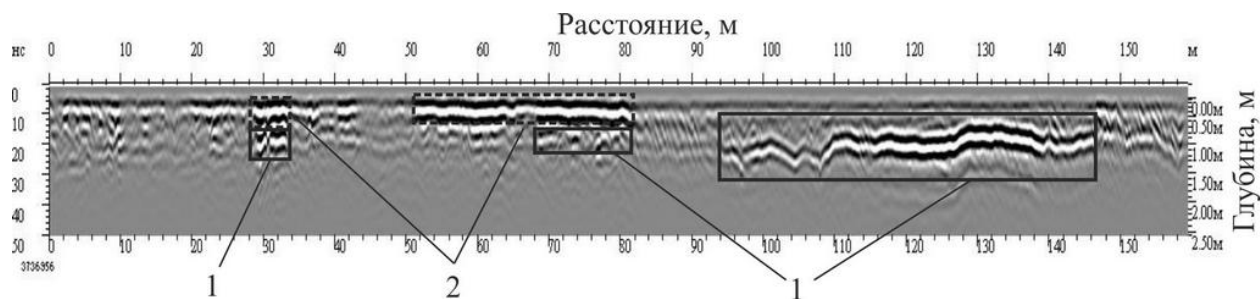


Рисунок 3.9 – Выявление обводнения на вскрышном блоке:

1 – участок обводнения массива горных пород; 2 – участок приповерхностного обводнения

Обводненность на радарограмме определена по высококонтрастным (большие значения амплитуд) низкочастотным, на общем фоне, осям синфазности сигналов. На 30-ом метре по профилю оно распространяется вглубь массива на 0,5-1,2 м, а с 68-го по 82-ой - на глубину 0,8-1 м., также, на разрезе выявлено приповерхностное обводнение. При дальнейшей обработке данных возможна количественная оценка влажности горных пород [84, 85].

При разработке месторождений криолитозоны, также важным является обнаружение криогенных процессов в многолетнемерзлых горных породах [86, 87]. Зоны повышенной влажности показаны на радарограмме в виде отраженных кратных электромагнитных волн на границе сильновлажных и сухих (мерзлых) грунтов (Рисунок 3.10а). При выделении зон повышенной влажности эти волны выступают в качестве индикатора, по которому устанавливают местоположение увлажнения по глубине и расстоянию. Зоны суффозии образуются в результате выноса водным потоком части грунтов определенной фракции, что приводит к нарушениям горизонтально-слоистого строения. Наличие нарушенных структур, вызванных ослаблением грунтов, на радарограммах отображается дифракцией электромагнитных волн и получением хаотичных сигналов отражений (Рисунок 3.10б). Зоны пучения грунтов на радарограмме представляются в виде линзообразных объектов, сформированных протяженными осями синфазности, наиболее

уверенно проявляющиеся в процессе протаивания грунтов, когда возникают дополнительные отражающие границы и локальные зоны, связанные с изменением мерзлотно-грунтовых условий участка (Рисунок 3.10в) [87].

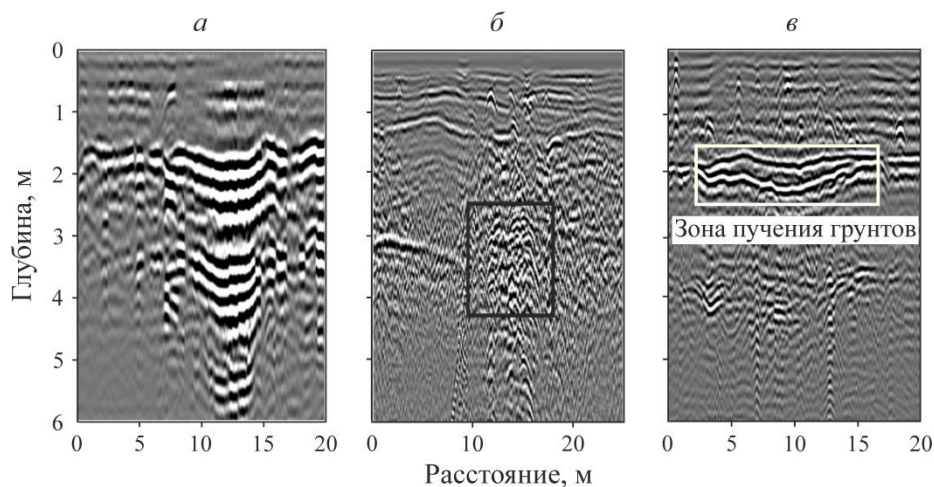


Рисунок 3.10 – Интерпретационные признаки криогенных процессов в горных породах на радарограмме: *а* – слой повышенной влажности; *б* - зона суффозии, *в* – зона пучения грунтов [87]

Для примера выявления талой породы представлены исследования подтвержденные буровыми работами [88]. Верхнечетвертичные аллювиальные отложения до пробуренной глубины 10,0 м сложены песками пылеватыми, мелкими, средней крупности сверху перекрытыми техногенными грунтами и почвенно-растительным слоем мощностью 0,2-0,9 м. Поверхностное оттаивание грунтов на момент работ достигало 0,7-1,8 м, в интервале 0,2-4,2 м грунты находились в сыпучемерзлом состоянии, ниже - твердомерзлом состоянии, с массивной криогенной текстурой. По трем скважинам обнаружены талые грунты. В районе скважины №1, они распространены в интервале 1,2-3,1 и 4,0-4,5 м, скважины №2 в интервале 1,5-3,5 м и 4,5-5,0 м, скважины №4 в интервале глубин 3,2-8,3 м (Рисунок 3.11). Буровые и георадиолокационные работы выполнены в разное время. На момент проведения георадиолокационных исследований мерзлый слой на поверхности отсутствует.

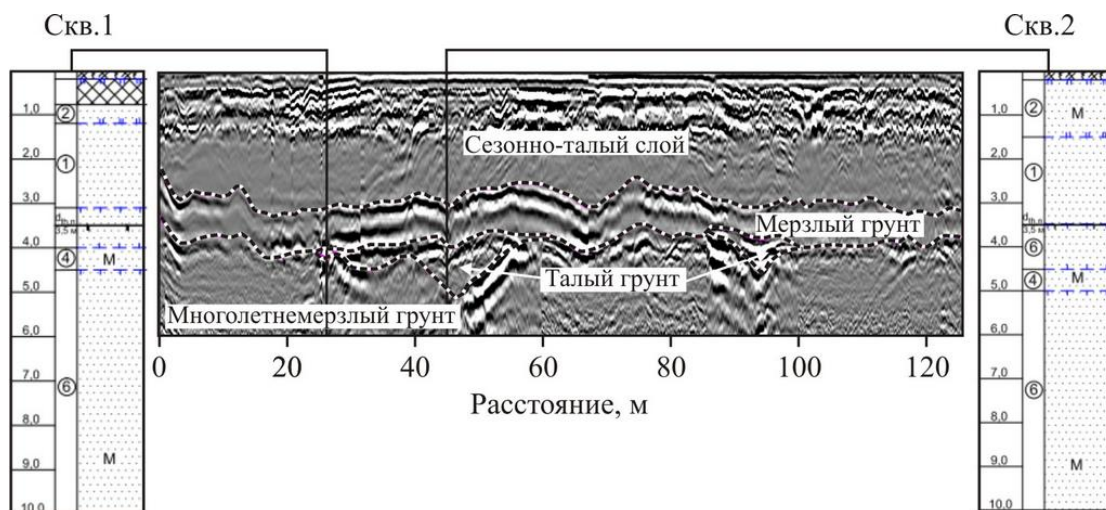


Рисунок 3.11 – Пример выявления талых грунтов на радарограмме [88]

В результате сопоставления времени задержки георадиолокационных сигналов с данными скважин определены средние значения относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) по разрезу: 4,5 – для сезонно-талых грунтов, 4 – для мерзлых, 9 – для талых. При интерпретации данных установлено, что глубины выявленных объектов и мерзлых грунтов на радарограмме немного не совпадают с данными Скв.1 и Скв.2., что наиболее вероятно связано с различной влажностью грунтов сезонно-талого слоя. Для обеспечения визуализации радарограмм в процессе обработки применены стандартные процедуры программного обеспечения «GeoScan32»: реверс, удаление трасс, привязка ноля к поверхности среды, частотная фильтрация, коррекция затухания амплитуд. Зоны георадиолокационных аномалий, связанные с талыми грунтами в толще мерзлоты, определены по высокоамплитудным сигналам-отражениям и по признаку наличия низких частот. Аномалии выявлены в интервалах 22-58 м и 85-100 м по профилю. На участке исследований в качестве основного поискового признака сигналов отраженных от границ сезонно-талого слоя и мерзлых грунтов на радарограммах, была принята последовательность высокоамплитудных низкочастотных сигналов, полученных на диэлектрически контрастной границе [88].

На рисунке 3.12 представлен георадиолокационный разрез полученный при обследовании очистного пространства дражного полигона с поверхности торфов на месторождении р. Аллах-Юнь георадаром «ОКО-2М» с антенным блоком АБ-250. Зондирования проведены в весенний период. Разрез масштабирован по глубине, в соответствии с данными бурения, и обработан с учетом характеристик сигналов, образующих оси синфазности при отражении от кровли коренных пород. Учитывая, что золото в россыпи р. Аллах-Юнь тяготеет к нижним горизонтам русловых отложений, характеризующихся повышенным содержанием валунного материала и, в ряде случаев, проникает в выветрелые и трещиноватые коренные породы, то повышенный интерес вызывают участки структурных неоднородностей геологического разреза.

На волновой картине удалось выявить сигналы, соответствующие нарушенной структуре коренных пород – тип 1 (Рисунок 3.12а), в окрестности скважин 1 и 3, и ненарушенной – тип 2 (Рисунок 3.12б), скважины 2, 4, 5, 6 [68, 89]. Таким образом, по данным георадиолокации определена глубина залегания плотика в пределах 4,5-6,8 м и установлено, что коренные породы нарушены на участке скважины 1 на протяжении 17 м от начала профиля и в окрестности скважины 3 на отрезке 30-52 м.

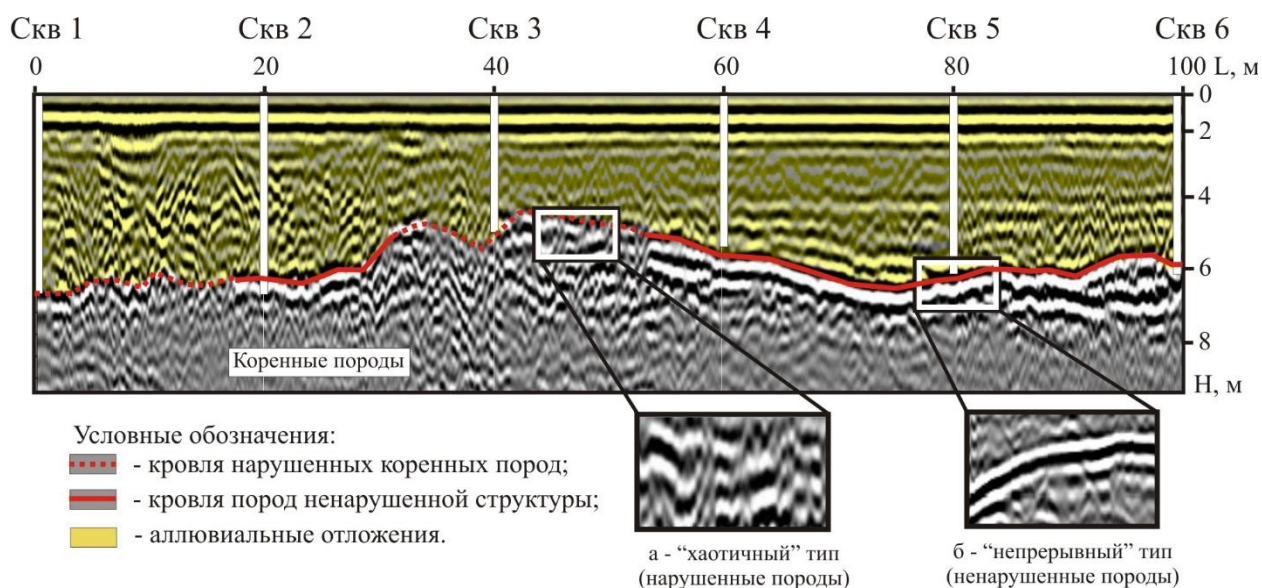


Рисунок 3.12 – Результаты изучения строения массива горных пород

Выделение границ различных геологических слоев на радарограммах возможно благодаря различию электрофизических свойств горных пород [95]. Выявление нарушенных структур в толще массива выполняется по анализу волновой картины [60]. Критериями их выявления являются: изменение времени задержки сигналов, образующих синфазные оси дифракции электромагнитных волн, отображающиеся на радарограмме как чередующиеся белые и черные линии; разрыв осей синфазности [22, 96, 97]. Рассматривая эти характеристики более подробно, можно отметить также и различную интенсивность амплитуд отраженных сигналов, которая зависит от свойств слагающих пород. Обоснованность такого подхода к интерпретации георадиолокационных данных, в данном случае, определена тем, что оси синфазности образованы сигналами, отраженными от границ слоев горных пород и в тех местах, где происходит прерывание осей синфазности, совершенно определенно, изменяется структура породы.

Геологические структуры, отражающие радиоволны в толще коренных пород, также характеризуются различной волновой картиной. Это и протяженные оси синфазности от слоистых структур и хаотично распределенные сигналы от обломочных пород, местами образующих карстовые зоны.

При обработке данных с участка «Древняя Долина» выделены два основных типа волновой картины, связанные с изменением структуры коренных пород. Один из них представляет собой яркие наклонные отражающие границы, связанные с трещинами или разломами в коренных породах (Рисунок 3.13). Эти отражения достаточно распространены по исследуемому участку «Древняя Долина» в различных проявлениях (размер, угол наклона, направление, интенсивность отражений и их количество в определенном месте).

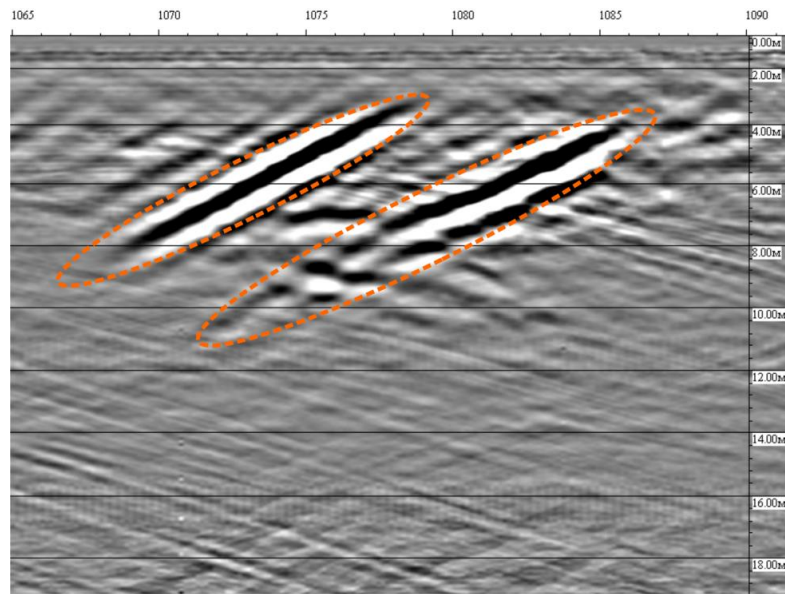


Рисунок 3.13 – Пример выделения локальных слоистых структур массива на фрагменте георадиолокационного разреза по участку «Древняя Долина»

Следующий наиболее распространенный волновой образ структурной неоднородности коренных пород представлен набором хаотично распределенных сигналов, местами с присутствием протяженных осей синфазности (Рисунок 3.14). Такие участки, возможно, являются зонами карстовых образований [70].

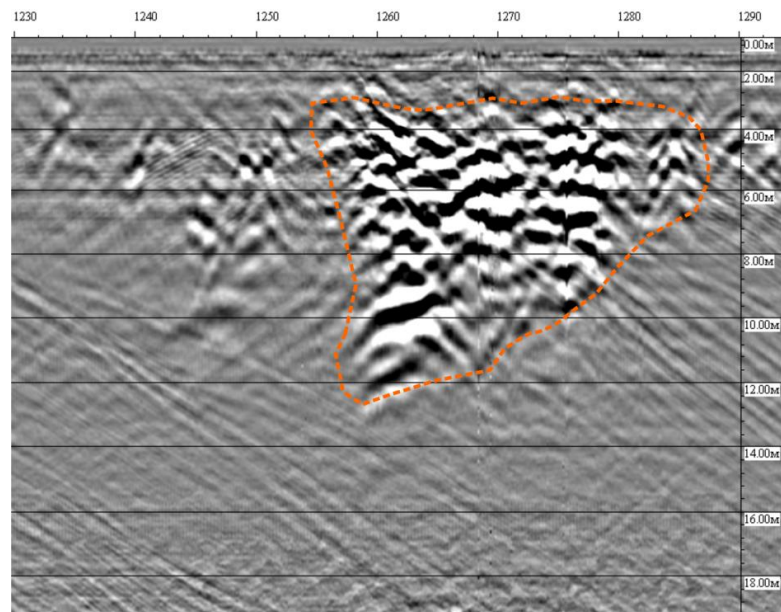


Рисунок 3.14 – Пример выделения зон структурных изменений массива на фрагменте георадиолокационного разреза по участку «Древняя Долина»



Глубинность на георадиолокационных разрезах определена по среднему значению диэлектрической проницаемости  $\epsilon'=6$ , определенной по локальным объектам на радарограмме в соответствии с методикой.

По результатам обработки и интерпретации установлено соответствие волновых образов на радарограмме определенным структурным изменениям в массиве. Тем самым выработаны критерии интерпретации георадиолокационных данных, по которым возможно выявление породных слоев, зон структурных изменений в коренных породах, связанных с трещиноватостью, либо разломом, с выделением в них участков предполагаемых карстовых образований.

Особым объектом георадиолокационных исследований являются техногенные россыпи [98]. Здесь георадиолокация может быть использована для разведки и картирования законтурных целиков, локализации недоработок пласта по мощности, в том числе зон трещиноватости коренных пород и крупноглыбовых отложений, как с земной, так и с водной поверхности [91]. Например, на россыпном месторождении р.Аллах-Юнь проведены георадиолокационные исследования с поверхности воды на участке, отработанном драгой. Зондирования проводились антенным блоком АБ-250М, установленным на дне резиновой лодки. На рисунке 3.15 представлен результат георадиолокационного зондирования по профилю, проходящему между дражными ходами с поверхности воды [92, 93, 89].

Георадиолокационные исследования между дражными ходами позволили обнаружить отвалы, скрытые под водой (Рисунок 3.15). На представленной радарограмме можно проследить геометрию отвалов и границу коренных пород до глубин более 5 м. По характеристикам волнового поля установлено, что данные отвалы представлены в основном галечным материалом (мелкие волны дифракции), с включением крупных валунов (крупные волны дифракции), проявляющихся на радарограмме как отдельные гиперболы. По таким же признакам выявлены скопления валунов на дне дражного котлована (месторождение р. Б.Куранах).

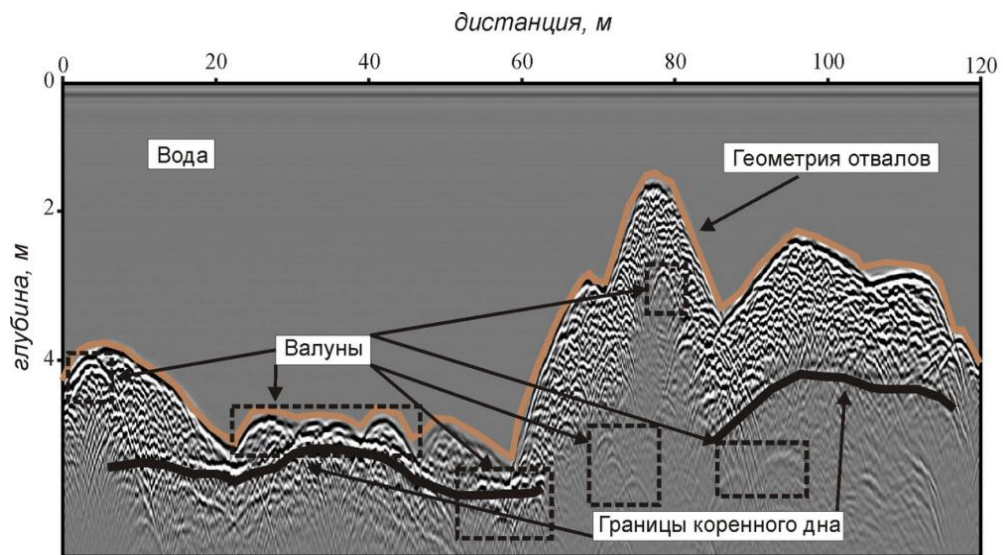


Рисунок 3.15 – Фрагмент георадиолокационного разреза по профилю, проходящему между дражными ходами (месторождение р. Аллах-Юнь)

Обнажения скальных пород на волновой картине представлены высокоамплитудными осями синфазности сигналов (Рисунок 3.16) [94]. Контраст границ между водой и скальными породами обеспечивается большим различием в значениях электрофизических свойств (вещественной части диэлектрической проницаемости). Крупно-глыбовые и монолитные коренные породы не впитывают воду, как например, различные пески или суглинки, поэтому сохраняют низкие значения диэлектрической проницаемости (6-20) по сравнению с водой (81).

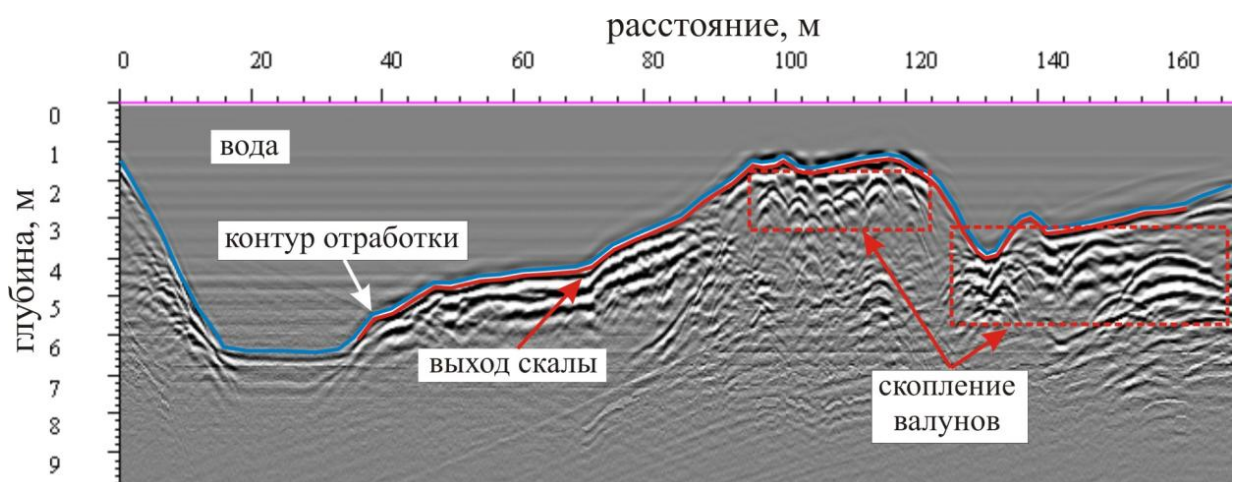


Рисунок 3.16 – Георадиолокационный разрез по очистному пространству дражного котлована (р. Б.Куранах)

Следующие исследования техногенных отвалов проведены в зимнее время при полном их промерзании (Рисунок 3.17) георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ250М [92]. Для мерзлых песков различного гранулометрического состава значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) находятся в диапазоне 3,5-6,5 [15]. По полевым данным с обследуемых участков техногенных отвалов методическим способом определена средняя диэлектрическая проницаемость  $\epsilon' = 4$ , используемая для глубинного масштабирования георадиолокационных разрезов (Рисунок 3.18).



Рисунок 3.17 – Георадиолокационные исследования отвалов дражной отработки на месторождении россыпного золота р.Аллах-Юнь

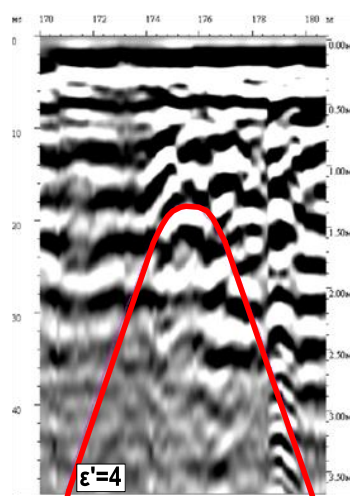


Рисунок 3.18 – Определение вещественной части диэлектрической проницаемости на радарограмме по волнам дифракции от валунов и крупнообломочного материала

В качестве примера георадиолокационного обследования отвалов дражной отработки россыпного месторождения золота представлена радарограмма протяженностью более 35 м (Рисунок 3.19) [92]. На ней выделена кровля коренных пород на глубине 5-7 м и слой дражных отвалов. При этом по волновым полям прослеживается сортировка песков по гранулометрическому составу в процессе дражной переработки [80]. Галечный слой на радарограмме отличается от эфельного наличием большого количества гиперболических волн, возникающих при дифракции электромагнитных волн на крупной гальке и валунах. Хаотичное распределение гиперболических волн формирует своеобразную волновую картину, которая существенно отличается от волнового образа песков [95-97, 100-105]. Таким образом, по данным георадиолокации в перебитых песках можно выделить две основные составляющие: галечный и эфельный материал, а при площадных исследованиях еще и оценить их объем.

Представленные материалы с техногенных россыпей показывают возможность оценки методом георадиолокации мощности отвалов, расчленение их по гранулометрическому составу и локализации зон крупноглыбовых отложений.

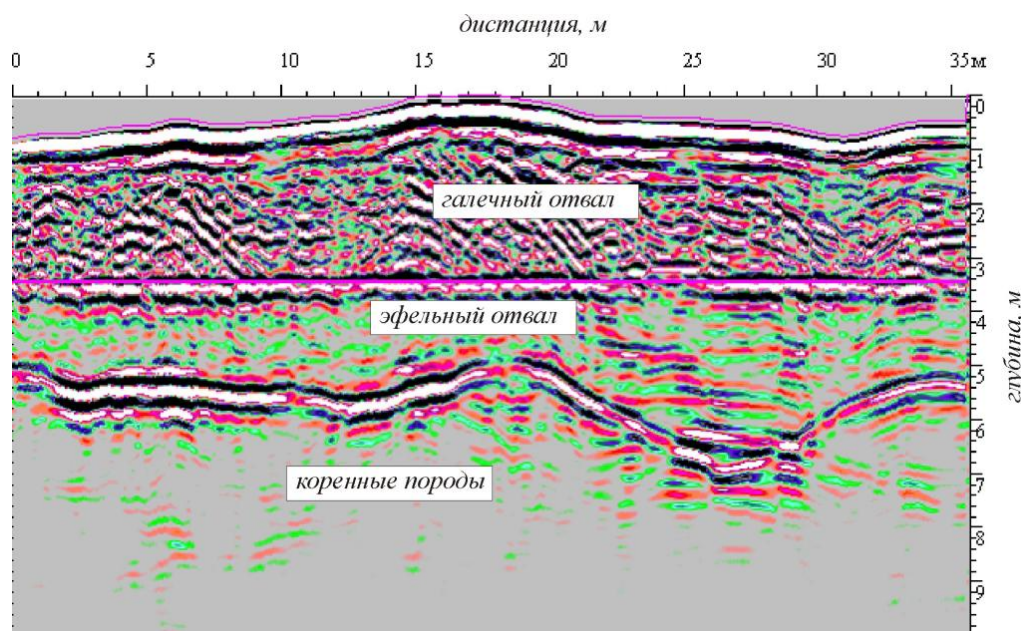


Рисунок 3.19 – Строение отвалов дражной отработки на месторождении россыпного золота р.Аллах-Юнь по данным георадиолокации

Заключительным этапом интерпретации является оцифрованный георадиолокационный разрез распределения выделенных отраженных границ от геологических сред и их структур, необходимый для последующей визуализации результатов исследований.

Визуализация результатов происходит с использованием процедур корректировки яркости и контрастности радарограмм, а также различным способом представления георадиолокационных сигналов или результатов их обработки [106]. Конечная иллюстрация должна отображать пространственное строение исследуемого блока, обеспечивать возможность оценки картируемого объекта и планирования горных работ (Рисунок 3.20).

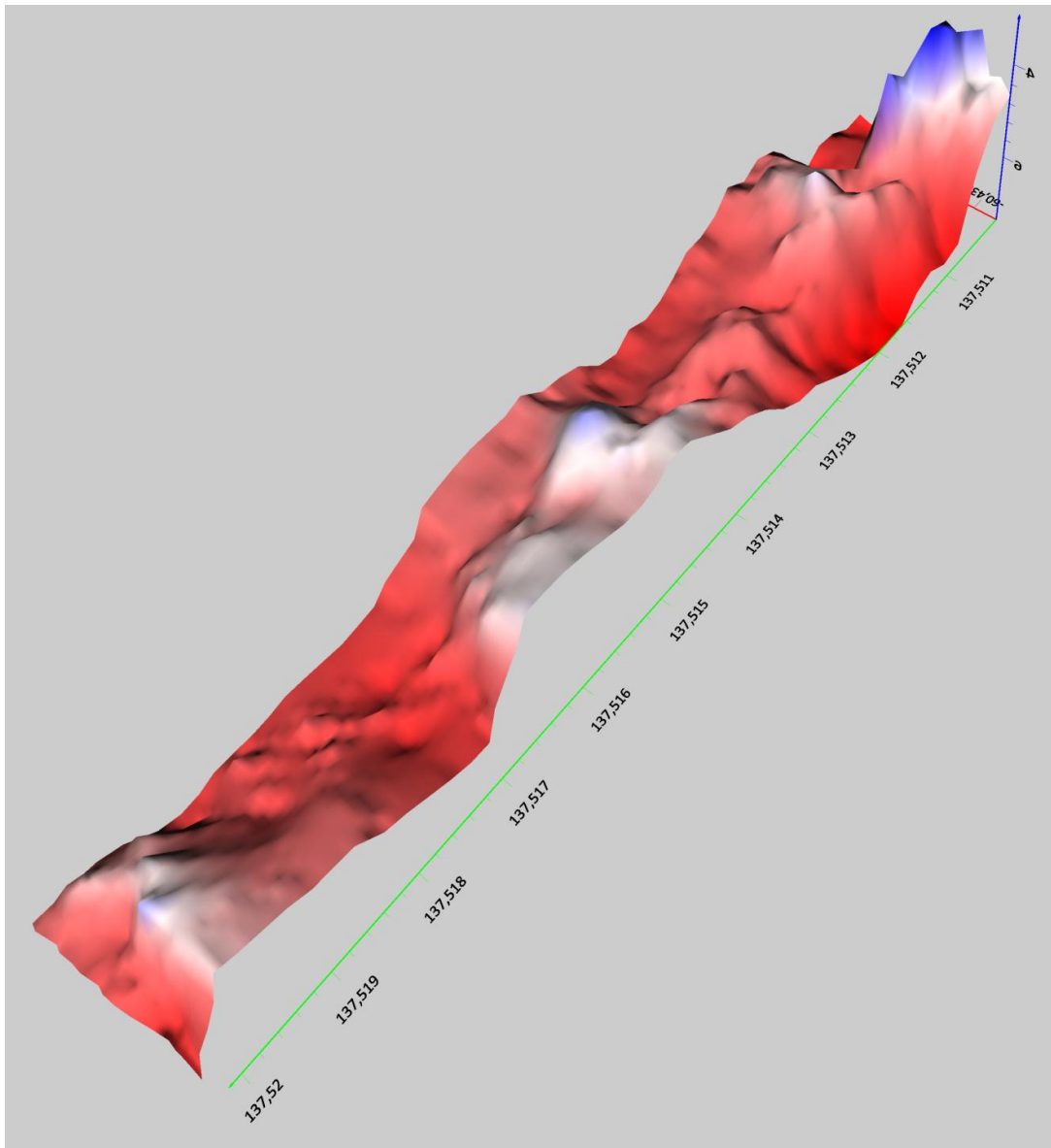


Рисунок 3.20 – Трехмерное представление рельефа плотика дражного полигона по данным площадных исследований методом георадиолокации (месторождение р. Аллах-Юнь)

## ВЫВОДЫ

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. Особенностью обработки данных УГС является сборка единой радарограммы длиной 1500 трасс из отдельных файлов по 100 трасс в 15 угловых положениях.

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

Предложенная последовательность процедур обработки данных комплексирования площадного профилирования и УГС позволит повысить информативность и достоверность картирования массива: мощности отвалов, зоны трещиноватости коренных пород, крупноглыбовых отложений, зоны обводнения во вскрышных блоках, локализации недоработок пласта по мощности. Установленные соответствия волновых образов на радарограмме определенным структурным изменениям в массиве горных пород позволяют выявлять: границы геологических слоев, зоны структурных изменений в коренных породах, связанных с трещиноватостью, либо разломом, с выделением в них участков предполагаемых карстовых образований, талые и обводненные зоны. Информативная визуализация результатов георадиолокации способствует возможности оценки картируемого объекта и планирования горных работ.

## 4 Результаты георадиолокационных исследований особенностей строения горного массива месторождений криолитозоны Якутии

### 4.1 Площадные георадиолокационные исследования на месторождениях с различными горно-геологическими условиями

Своевременное выявление и оконтуривание критических зон на участках проявления геологических нарушений и обводнения позволит заблаговременно предусмотреть комплекс технологических мероприятий, обеспечивающих безопасность и эффективность работ. При открытых горных работах на угольных месторождениях Якутии преобладающее значение нашел взрывной способ подготовки мерзлых пород к выемке. В условиях обводненности разрабатываемых блоков ухудшаются показатели взрывных работ и выемки пород. Обводненность и повышенная влажность породы способствуют налипанию, примерзанию пород к техническим деталям выемочно-погрузочного оборудования и емкостям транспортных средств, простоям и удорожанию себестоимости разработки [107-109]. Поэтому, знание условий обводнения взрываемого блока необходимо для выбора рациональных параметров взрывных работ, типа взрывчатого вещества и конструкции скважинного заряда, прогноза состояния экскаваторного забоя [110, 111, 38].

Для подтверждения наличия обводненности и картирования границ обводнения на Кангаласском буругольном месторождении проведены георадиолокационные исследования. В пределах участка отработки мощность перекрывающих пород достигает 38 м, все породы многолетнемерзлые. При бурении взрывных скважин на блоке наблюдались залповые выбросы воды из соседних скважин на высоту до нескольких метров и несколько скважин при этом были залиты водой [111].

Анализ геологического строения участка и результатов рекогносцировочных зондирований показали, что для проведения

исследований по площадному картированию обводнения достаточно возможностей георадара в спектре частот 100-200 МГц (АБ-150). Этот диапазон позволяет в условиях данного участка получить георадиолокационный разрез с достаточной разрешающей способностью (до 0,35 м) и выделить верхнюю границу обводнения. Для обнаружения нижней границы обводнения, ввиду большего затухания высокочастотных сигналов в обводненной зоне, необходимо проводить исследования в более низком спектре частот. Так, для картирования границ обводнения на третьем вскрышном блоке, несколько профилей были дополнены георадиолокационными разрезами полученными АБДЛ-30 (в спектре частот 25-100 МГц).

На рисунке 4.1 представлена схема вскрышного блока №2, на ней отмечены скважины, в том числе обводненные, отображен план георадиолокационных профилей, и околонуены зоны обводнения по данным георадиолокации.

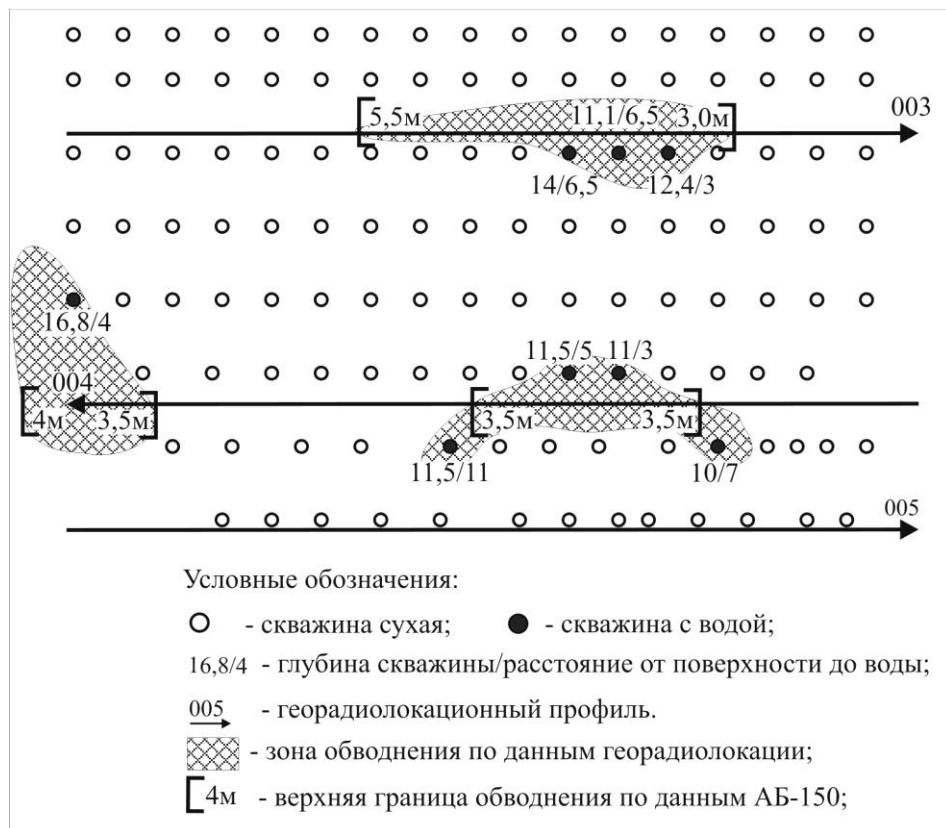


Рисунок 4.1 – Результат картирования зоны обводнения на вскрышном блоке №2 по данным георадиолокации



Глубина скважин варьируется в пределах 9-20 м. В качестве примера по выявлению зон обводнения рассмотрен профиль 003, проложенный по 3-му ряду скважин. Профилирование проводилось в непрерывном режиме, при временной развертке по глубине 200 нс, что при  $\epsilon'=4,0$  определяет глубинность до 15 м. Глубина георадиолокации на участке составила 7 м. Обработка полученных данных проводилась с помощью программы GeoScan32, также предназначенной для управления приборами подповерхностного зондирования «ОКО-2».

На рисунке 4.2 представлен георадиолокационный разрез по профилю 003, на котором выделена геологическая структура аномалии, размерами, примерно, 27 м в длину и 6,5 м в глубину. Границы аномалии образованы на радарограмме высокоамплитудными сигналами, начинающимися, примерно с 13 м по профилю, постепенно уходящие вниз от поверхности на глубину до 6,5 м. Затем, плавно поднимающиеся вверх, образуя аномалию, интерпретируемую как зона обводнения. Это также подтверждается низкочастотными сигналами в этой зоне, обусловленными затуханием высоких частот в среде, с более высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$  (4,0 для сухих и около 60 для обводненных вскрышных пород) [49, 112].

Аналогичные работы были выполнены на вскрышном блоке №3, на участке размером 67м\*72м. Георадиолокационные исследования проведены по 15 профилям. Схема расположения профилей и скважин, сведения о наличии воды в скважинах, уровень обводнения по данным георадиолокации и результат картирования зоны обводненности представлены на рисунке 4.3.

Результаты исследований показали, что данные георадиолокации об уровне распространения обводненности согласуются с предварительными замерами в скважинах, а некоторое различие по определению границ обводненной зоны связано с разным временем проведения буровых и георадиолокационных работ [111].

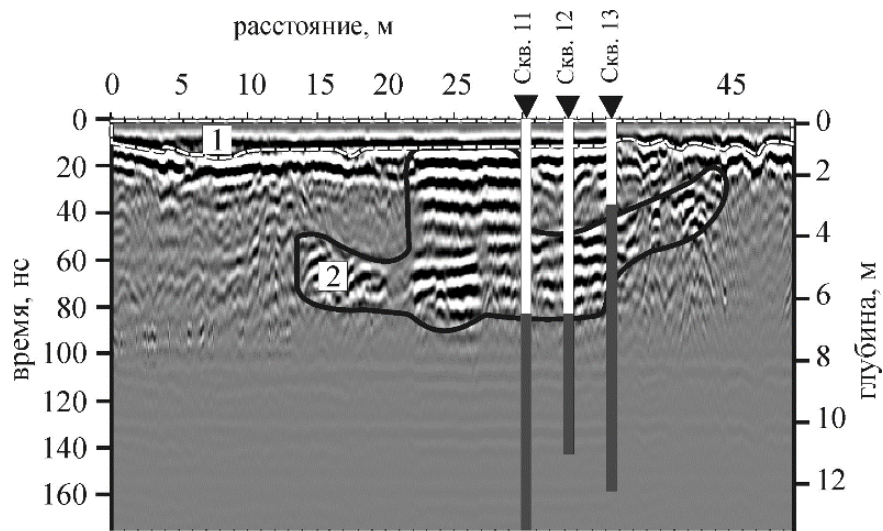


Рисунок 4.2 – Результат интерпретации данных георадиолокации по выявлению зоны обводнения во вскрышных горных породах: 1 — сезонно-талый слой; 2 — зона обводнения по данным георадиолокации; Скв. 11 – 13 — скважины



Рисунок 4.3 – Результат картирования зоны обводнения на вскрышном блоке №3 по данным георадиолокации

Далее представлено картирование условий залегания нарушенного угольного пласта в пределах рабочего участка в Нерюнгринском районе [110]. Согласно данным разведочного бурения по скважине №3 пласт угля выявлен на глубине 2,5 м. Всего по линии разведочного бурения выполнено три скважины, глубиной 10 м. В Скв.1 и Скв.2 угольный пласт не обнаружен.

В окрестности Скв.1 проведены рекогносцировочные зондирования георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150 [53]. По сопоставлению данных бурения скважины №1 и георадиолокационных сигналов определена средняя скорость распространения электромагнитных волн:  $v=0,087$  м/нс (Рисунок 4.4). Эта скорость принята для расчета глубинного разреза.

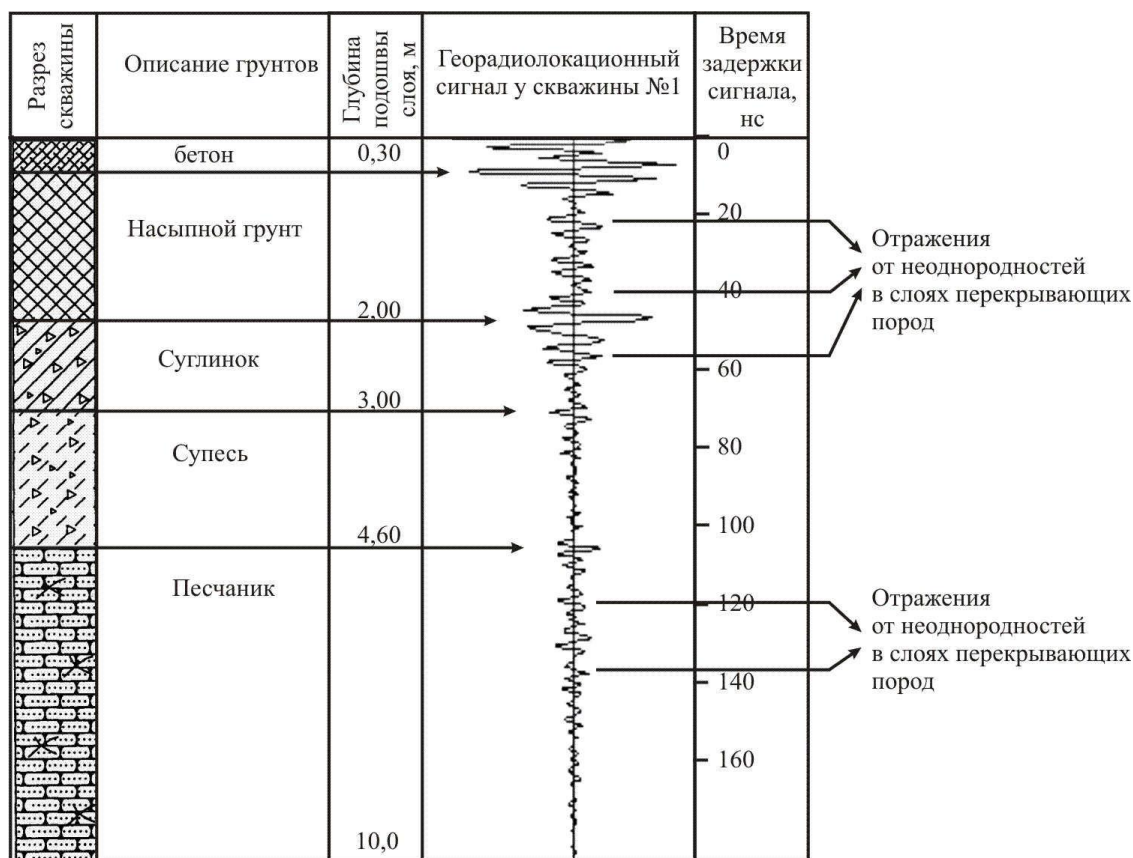


Рисунок 4.4 – Сопоставление данных бурения по Скважине №1 и георадиолокационных данных рекогносцировочных зондирований

На рисунке 4.5 (георадиолокационный профиль PR0022) показан сигнал в точке зондирования (т.з.) 19 возле скважины №3, на котором присутствует отраженный импульс, отождествляемый по амплитудно-

спектральным характеристикам, с границей угольного пласта. На радарограмме такие импульсы зафиксированы по оси синфазности с т.з. 13 по т.з. 20, под углом  $\alpha^\circ$ , в пределах глубин 2-2,5 м.

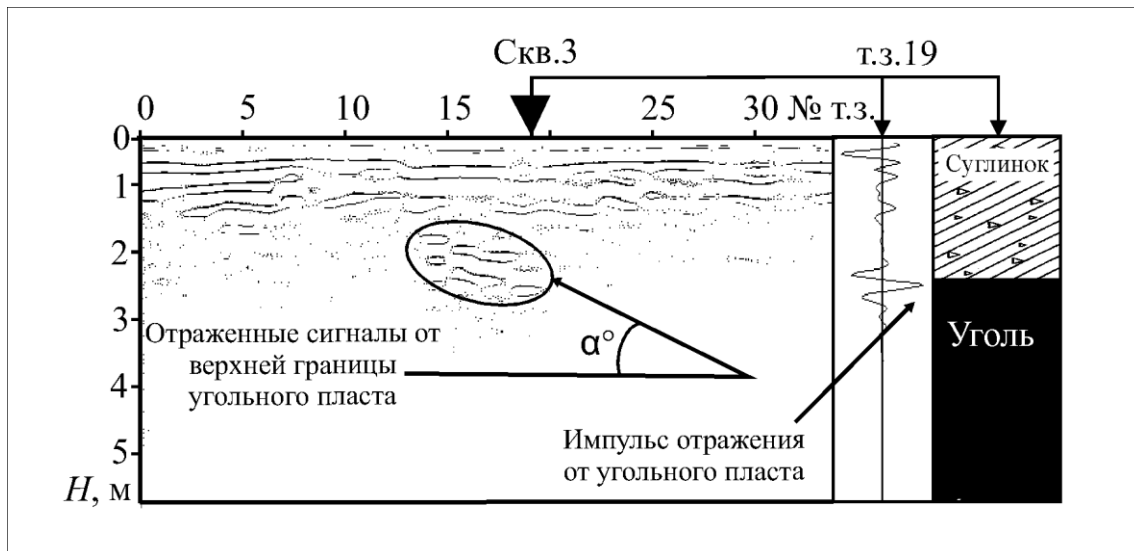


Рисунок 4.5 – Выявление угольного пласта по данным георадиолокации

На рисунке 4.6 представлен план профилей и отмечены границы георадиолокационного картирования угольного пласта, с указанием глубин его залегания. В результате проведенных исследований, установлено, что выход угольного пласта имеет некоторый уклон  $\alpha^\circ$ , в сторону Севера и пласт практически вертикально выклинивается к поверхности в зоне разлома. На георадиолокационных разрезах отраженными импульсами четко прослеживается геометрия верхней границы угольного пласта, перекрытого рыхлыми отложениями, что позволяет определить пространственное положение пласта. При этом нужно учитывать, что линии георадиолокационных профилей необходимо прокладывать в крест простирания протяженной неоднородности.

Далее рассмотрены методические основы георадиолокации дражных полигонов криолитозоны и проведены экспериментальные исследования на золотоносных месторождениях р. Большой Куранах и р. Аллах-Юнь [93, 94].

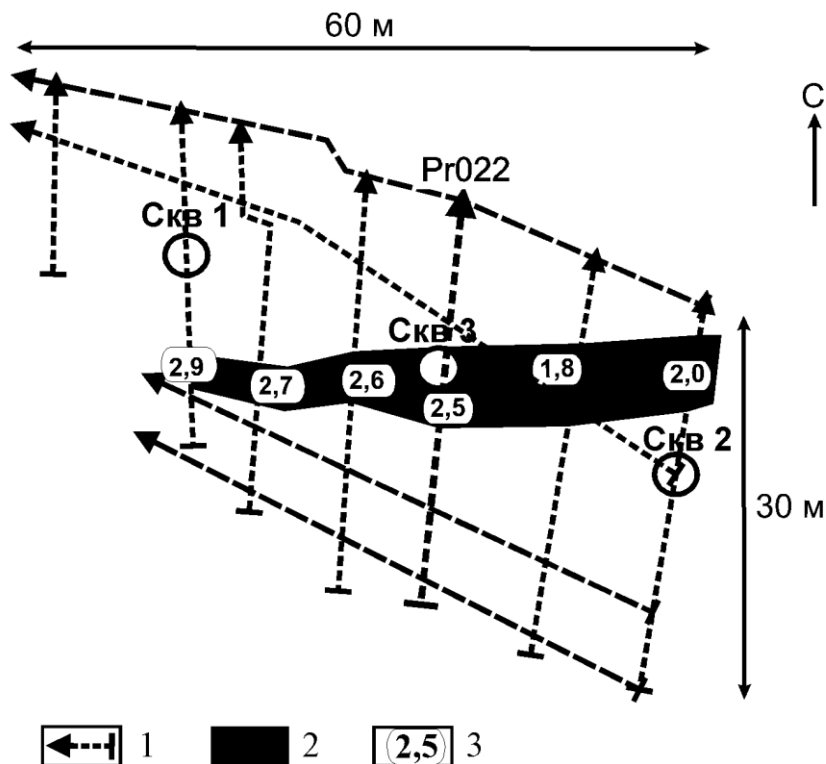


Рисунок 4.6 – План участка исследований и результат оконтуривания выхода угольного пласта: 1- план георадиолокационных профилей; 2 - угольный пласт; 3 – мощность перекрывающих угольный пласт пород

Мощность торфов на месторождении р. Аллах-Юнь [113] изменяется от 2,7 м в пойме до 10 м в пределах пойменных террас. Мощность песков колеблется от 0,4 до 5,2 м. Размер фракций галечного материала не превышает 10 см, а валунов 20-30 см, изредка 50 см. Мощность деятельного слоя колеблется от 0,2-0,3 м до 3,0-3,5 м.

Аллювиальные отложения, заполняющие долину р. Большой Кураных [114], представлены серыми песками и валунно-галечными образованиями, мощностью от 4 до 12 м. Погребенные отложения, подстилающие современные образования пойменной части и террас, слагают борта долины, поднимаясь над поймой на 10-20 м. Содержание крупнообломочного материала (класс +10 мм) достигает 30% при содержании илисто-глинистой фракции 40-60% с незначительными включениями (до 2-4%) валунов размером 2-4 м [68].

На россыпном месторождении золота р. Аллах-Юнь проведено георадиолокационное изучение гипсометрии плотика [115]. Исследования проводились в весенний период, по расчищенным от снега профилям, с поверхности льда георадаром «ОКО-2» антенной АБДЛ-Тритон (50 МГц) (Рисунок 4.7). Выбранный участок с осени полностью подготовлен к отработке и залит водой для уменьшения глубины промерзания песков. Для уточнения результатов георадиолокации была пробурена скважина, по данным которой проведено масштабирование разрезов по глубине.

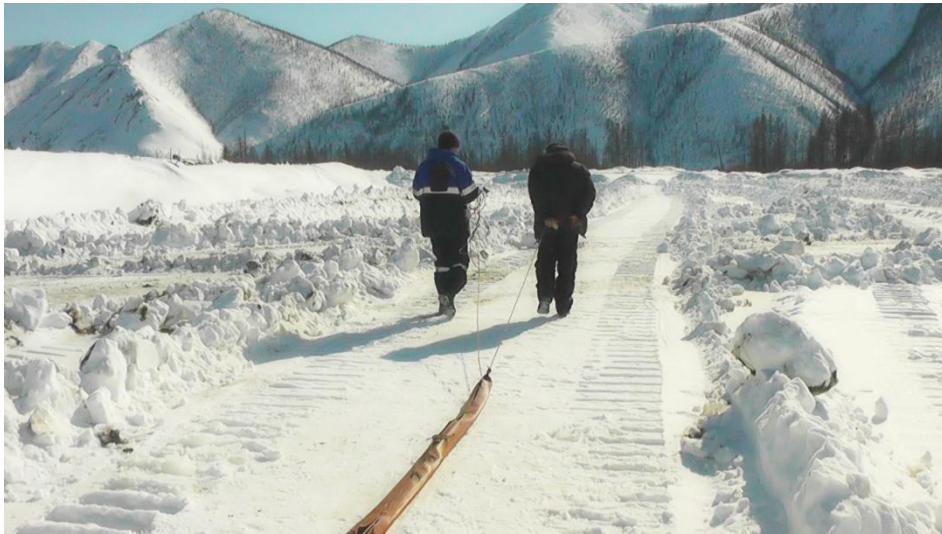
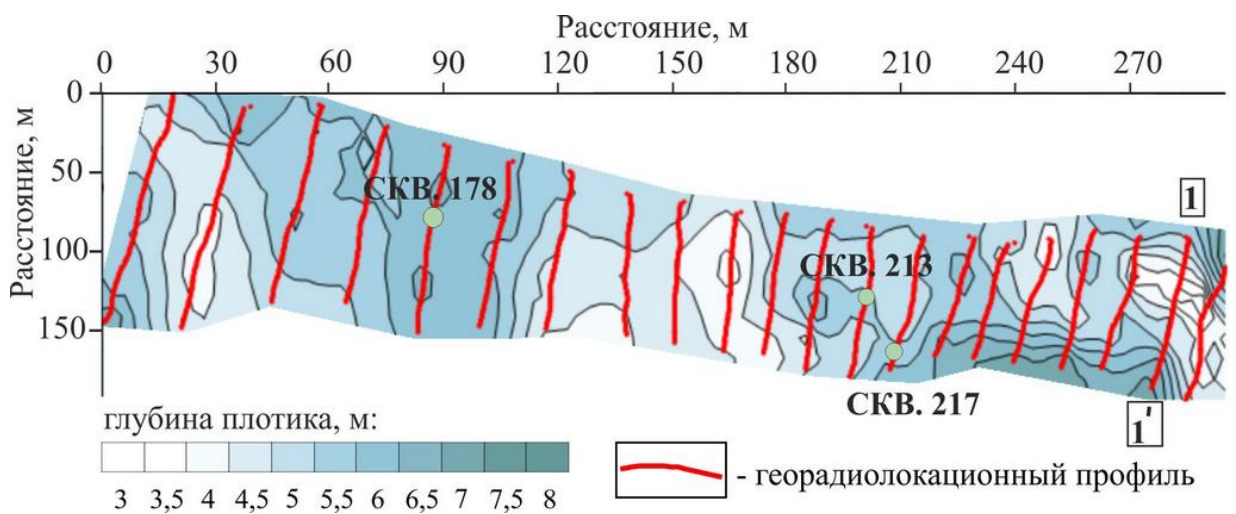
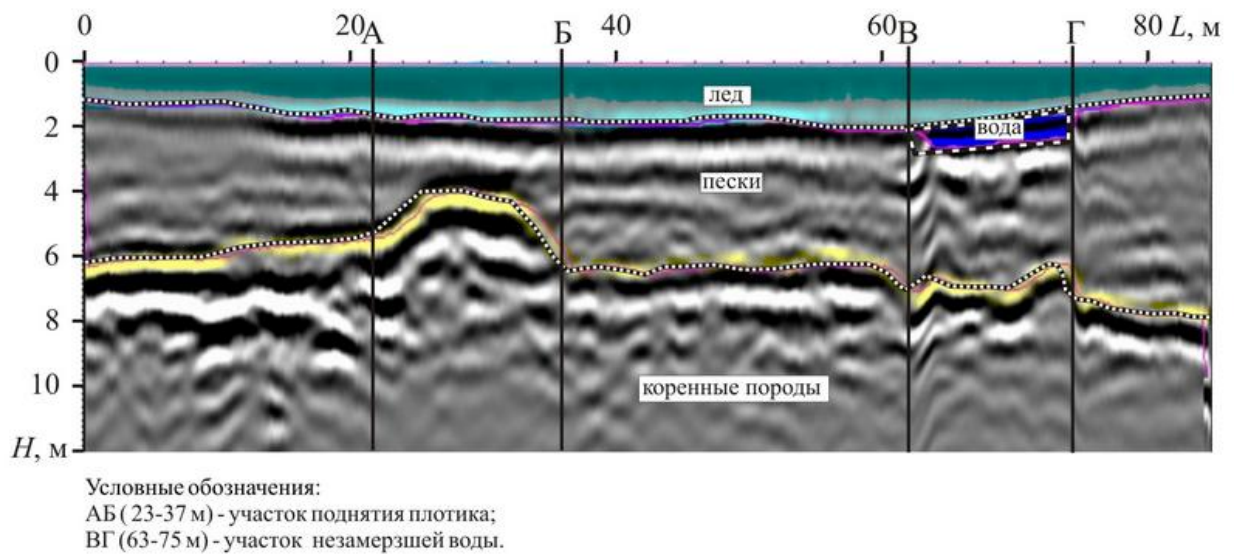


Рисунок 4.7 – Выполнение георадиолокации методикой профилирования

Для примера представлен разрез по поперечному профилю дражного полигона (Рисунок 4.8), где на отрезке ВГ (63-75 м) по высокоамплитудным низкочастотным сигналам выявлен участок незамерзшей воды, а также видно, что рельеф плотика изменчив и местами имеет поднятия более чем на 2 м от общего уровня по профилю (отрезок АБ, 23-37 м) [116]. Такие перепады вполне могут препятствовать ходу драги, особенно если невозможно повесить уровень воды [94].

По результатам площадных исследований по параллельным профилям установлено, что рельеф плотика изменчив и местами имеет поднятия более чем на 2 м от общего уровня по профилю. Такие перепады вполне могут препятствовать ходу драги, особенно если уровень воды

повысить невозможно. После обработки данных построена карта гипсометрии плотика по всей площади очистного пространства (Рисунок 4.9). Градация глубин идет с шагом 0,5 м, с увеличением глубины от светлых оттенков к темным [93, 89]. В результате можно выделить зоны поднятия плотика (3-4 м), которые могут повлиять на ход драги, а также учесть западения плотика при отработке, как возможные участки повышенной концентрации полезного ископаемого.



Методические исследования особенностей площадных георадиолокационных измерений на дражных полигонах с водной поверхности проведены на месторождении р. Б.Куранах [93]. На основе проведенного анализа существующих методик навигации плавательных средств на водной поверхности предложено, заносить в GPS-приемник план профилей георадиолокационного исследования и в процессе проведения георадиолокационной съемки сверять текущие координаты с разработанным планом профилей и, в случае отклонения от предполагаемого маршрута, корректировать направление движения плавательного средства. Это связано с тем, что навигация на водоеме без ориентиров затруднительна.

Установлено, что при движении георадара по водной поверхности необходима синхронизация георадиолокационных и GPS-данных (географические координаты), с возможностью получения информации о местоположении съемки каждого георадиолокационного сигнала (трассы).

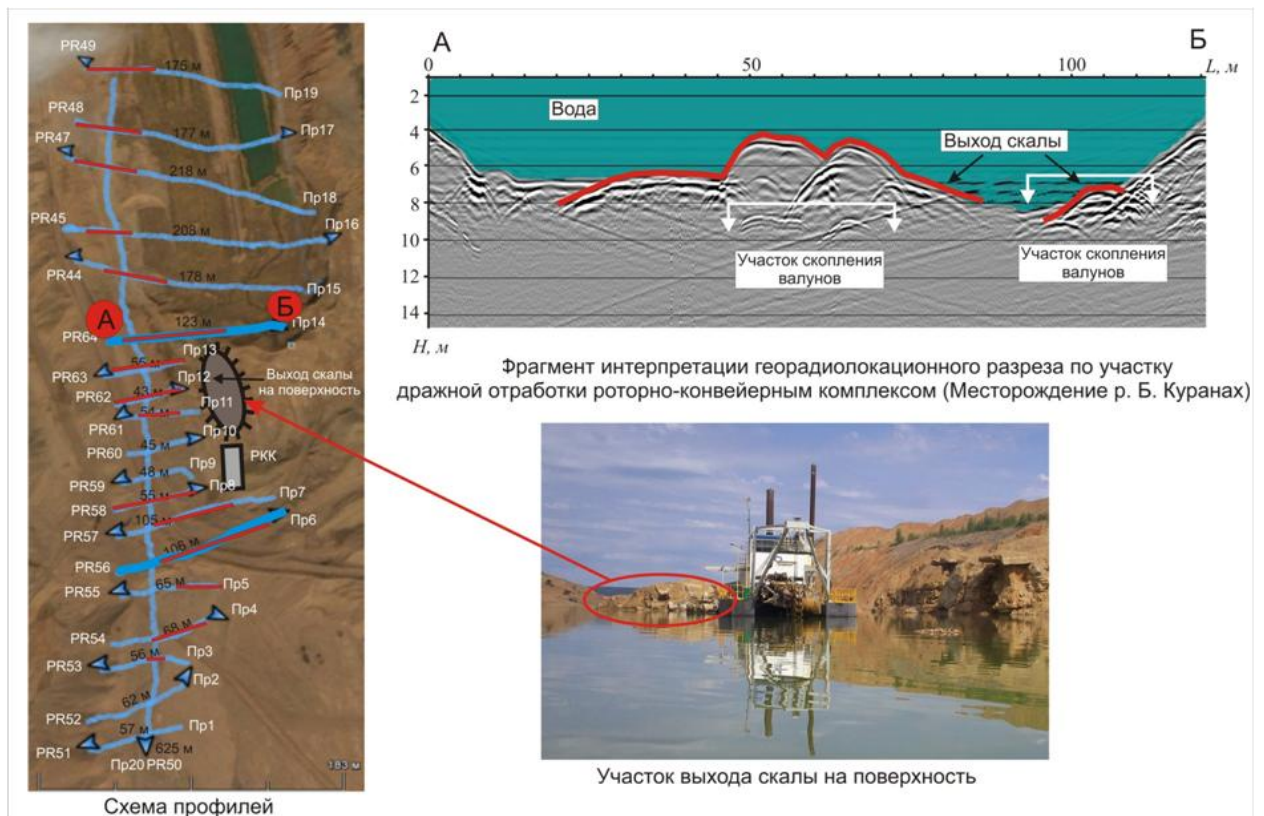


Рисунок 4.10 – Площадные георадиолокационные исследования с водной поверхности дражного полигона (месторождение р. Б.Куранах)



Исследования проведены на месторождении р. Б.Куранах, на участке находящимся на стадии отработки роторным земснарядом. По левому борту котлована, ориентировочно посередине, присутствует выход скалы на поверхность, часть его скрыта под толщей воды. На момент проведения георадиолокационных измерений рядом с ней находился земснаряд, поэтому небольшая площадь полигона осталась не охваченной исследованиями (Рисунок 4.10). Данные получены с поверхности воды георадаром «ОКО-2» (АБДЛ-50) по 20 профилям: 1 продольный (675 м), 19 поперечных (60-200 м). После обработки данных определен контур отработки котлована в пределах от 1,5 до 13,5 м по глубине. Полученные результаты позволили выполнить трехмерное отображение геологического строения россыпи с выделением обнажений коренных пород котлована на глубинах 4,5-7,5 м (Рисунок 4.11) [93, 89]. По данным отдельных разрезов установлено, что местами скальный выход образован скоплением крупных валунов, что подтверждено данными бурения, полученными до заливки котлована. Результаты исследований позволили также определить геометрические параметры котлована для его дальнейшей отработки земснарядом.

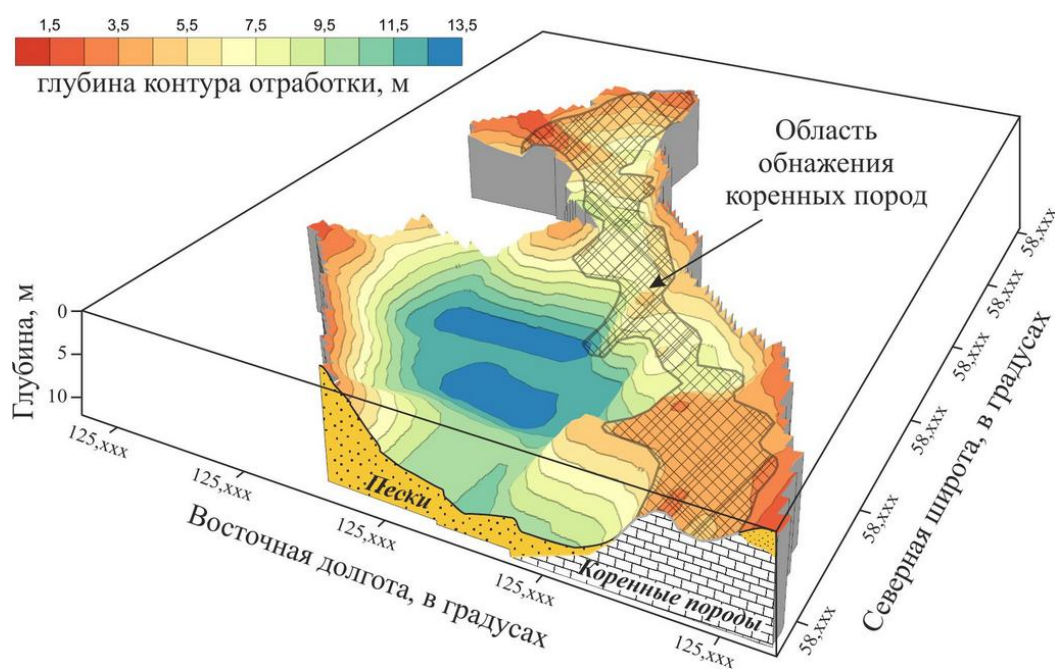


Рисунок 4.11 – Результат георадиолокационного картирования дражного полигона на месторождении золота р.Б.Куранах

В результате георадиолокационного картирования дражного полигона показана возможность трехмерного отображения геологического строения россыпи с выделением его структурных особенностей (мощность песков, гипсометрия и нарушенность плотика) с GPS-привязкой их местоположения, что имеет важное значение для оперативного контроля полноты и качества выемки золотоносных песков, выявления и пространственной локализации зон осложняющих добычу и принятия соответствующих технологических решений.

При преобразовании естественных экосистем в процессе развития горнопромышленного производства сформировались, так называемые, техногенные ландшафты, которые отличаются от естественных ландшафтов структурой, рельефом, гидрологическим режимом, субстратом и др. [117].

Основными видами нарушения экосистем в результате деятельности горнодобывающих предприятий являются наземные насыпи (промплощадки, отвалы, автодороги), земляные выемки (карьеры, нагорные и руслоотводные каналы и др.), обводнённые территории (отстойники, пруды–накопители) и линейные инженерные сооружения.

Значительное воздействие на территорию оказывает размещение спецотвалов пустых пород от выработки основных площадок и отвалов вскрышных пород. Негативное воздействие человеческой деятельности в связи с разработкой богатейших месторождений полезных ископаемых на природную среду Республики Саха (Якутия) усиливается из-за хрупкости северных экосистем, длительного срока восстановления, иногда потери способности к восстановлению. Кроме того, любое производство связано с отходами, оказывающими пагубное влияние на биогеоценоз.

С экологической точки зрения возможности применения метода георадиолокации достаточно широки – можно проследить, насколько глубоко загрязнены почвенно-гидрологические горизонты различными промышленными и бытовыми отходами, тем самым оптимизировать рекультивационные работы на загрязненных территориях. Местами

формирование отвалов происходит заполнением естественных и специально подготовленных углублений на земной поверхности (оврагов, рвов, котлованов). В дальнейшем оценка накоплений отходов на таких объектах затруднена, т.к. часть их скрыта в углублениях рельефа.

Далее приводятся результаты георадиолокационного картирования и определения морфоструктурного строения отвалов на примере свалки бытовых отходов. В момент обследования они находились в мерзлом состоянии, т.к. температура окружающего воздуха длительное время была ниже  $-45$  градусов. На территории несанкционированной свалки исследования проведены на площади более 90 тыс. кв.м. Обследование грунтов и отвалов на участках выполнено по 13-ти профилям (Рисунок 4.12) [92].

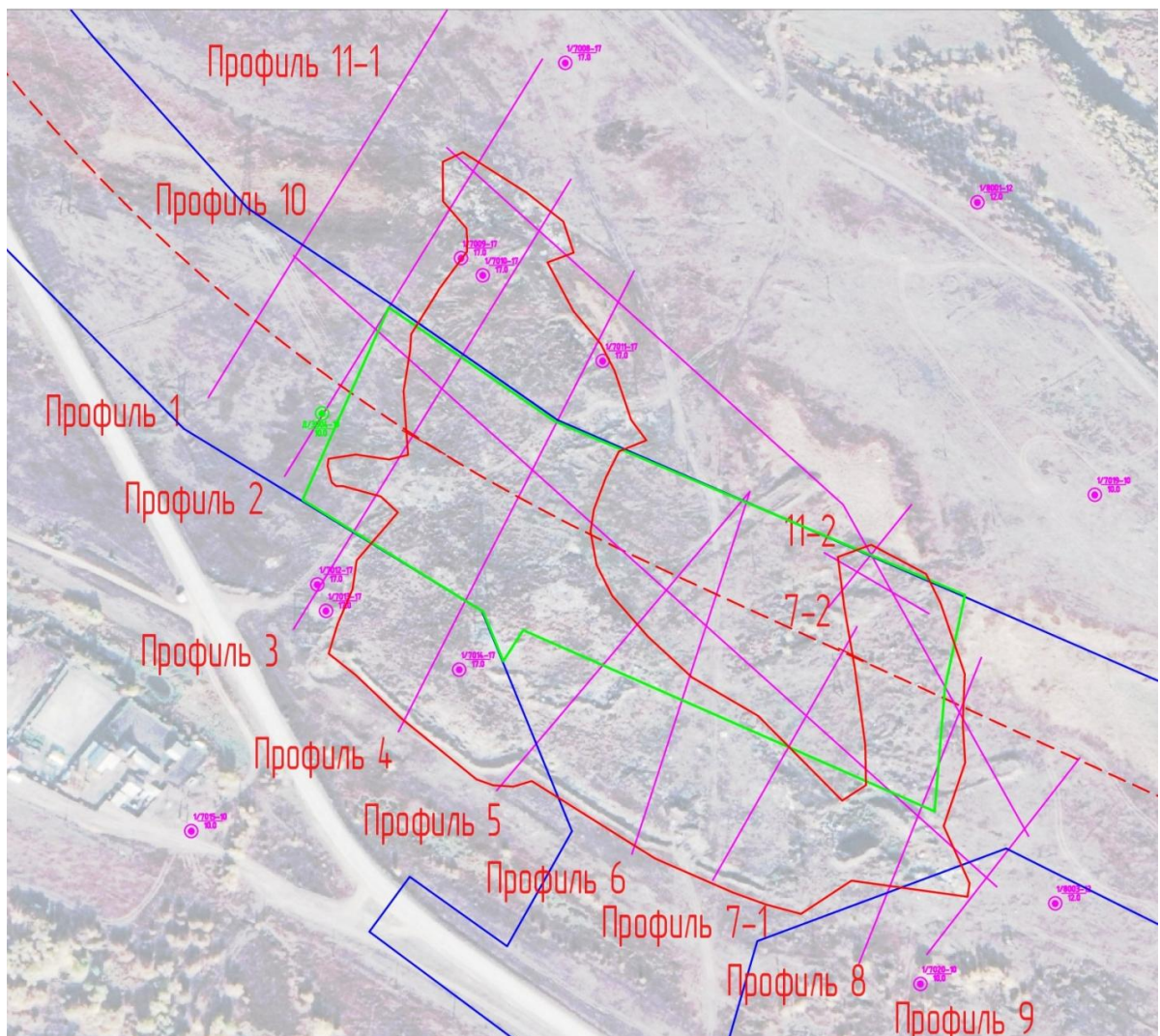
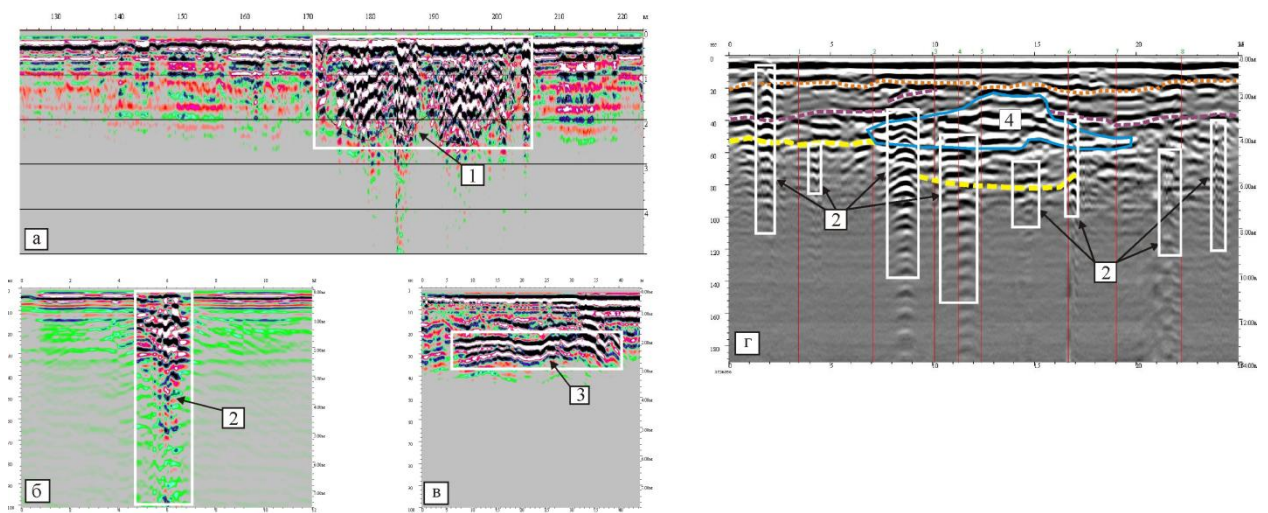


Рисунок 4.12 – План георадиолокационных профилей

В результате изучения особенностей георадиолокационных сигналов, полученных при зондировании грунтов на территории свалки, было установлено, что волновой образ техногенно-загрязненных грунтов характеризуется прерывистыми (хаотичными) осями синфазности, которые сформированы волнами дифракции от локальных объектов и структурных неоднородностей грунта (Рисунок 4.13а, г) [118-121].



Условные обозначения:

- 1- волновой образ техногенно-загрязненных грунтов;
- 2- волновой образ техногенно-загрязненных грунтов с включениями металла;
- 3- волновой образ границ с повышенной влажностью;
- 4- волновой образ линзы льда техногенного происхождения.

Рисунок 4.13 – Георадиолокационные разрезы с выделением участков загрязненных грунтов по волновым образам

Загрязненные участки с включением металла имеют схожий волновой образ, однако их особенностью является так называемый «звон» [122-125]. Он образуется в результате многократных отражений электромагнитных волн от металлической поверхности – например от металлических труб (Рисунок 4.13б, г). Таким образом, на радарограмме наблюдается последовательность повторяющихся отраженных сигналов во всем временном диапазоне регистрации данных. Соседние георадиолокационные трассы имеют более ровные по времени задержки и равномерные по

амплитудам сигналы и соотносятся с незагрязненными грунтами. Кроме описанных волновых картин, на радарограммах присутствуют сигналы от геологических границ, связанных с участками повышенной влажности – дренажем минерализованных грунтовых вод [126-128]. Они характеризуются непрерывными осями синфазности, образованными высокоамплитудными отраженными сигналами (Рисунок 4.13в). Местами техногенные жидкости замерзают в толще грунтов и потом обнаруживаются в виде линз льда (Рисунок 4.13г) [92, 122, 129].

Таким образом, полученные интерпретационные признаки морфоструктурных неоднородностей в строении отвалов позволили связать волновые образы на радарограммах с присутствием различных включений и обводнений (Рисунок 4.14). Разрезы приведены без учета рельефа местности, поэтому стоит отметить, что на отдельных участках высокие значения мощности техногенно-загрязненных грунтов связаны с отвалами и буграми на поверхности исследований.

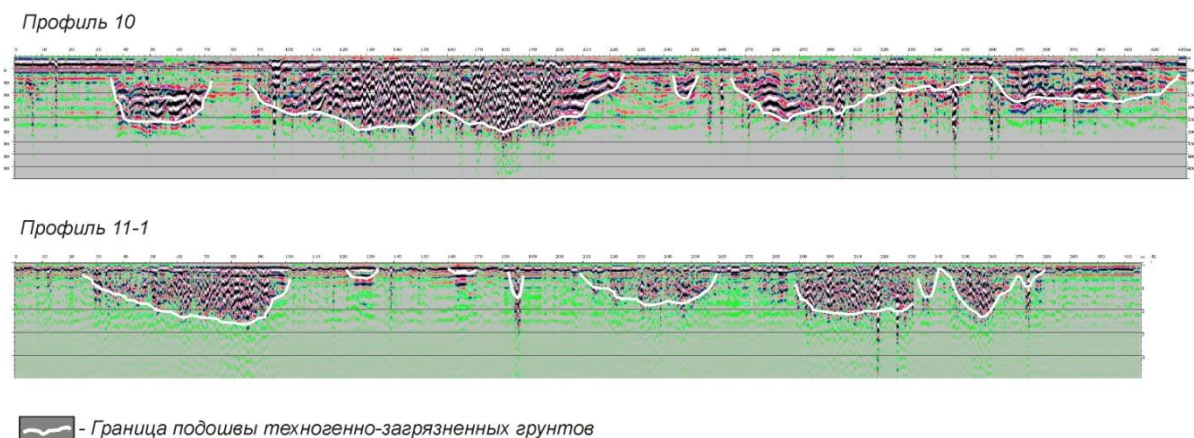


Рисунок 4.14 – Георадиолокационные разрезы с выделенными зонами техногенных загрязнений

Выделенными на радарограммах интервалами зон техногенных отходов формируется массив данных, содержащий полученные значения мощности загрязнений -  $Z$  в точке с географическими координатами  $X$ ,  $Y$  - основной результат обработки данных георадиолокации. Затем, этот массив

используется для построения карты (ПО Golden Software Surfer) геостатистическим методом пространственной интерполяции «Kriging», подходящим для большинства задач картирования с последующим подсчетом объема выявленных техногенных отходов (Рисунок 4.15) [130].

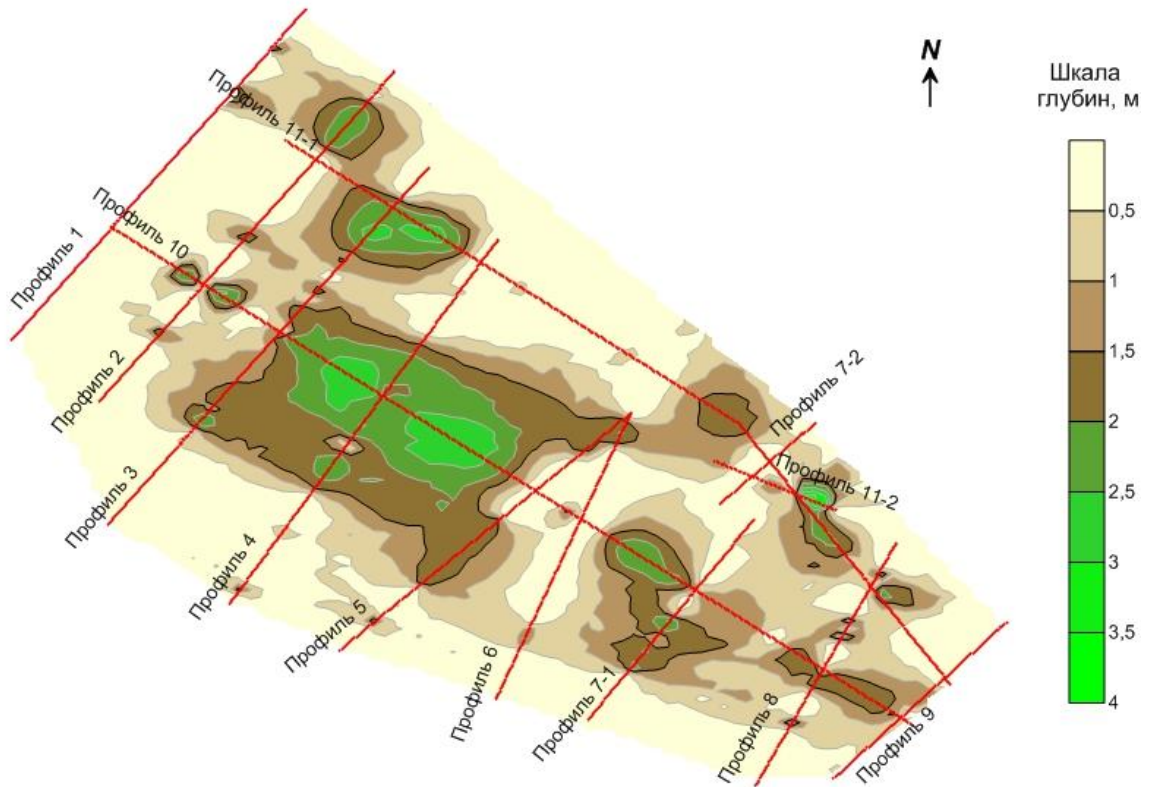


Рисунок 4.15 – Карта изолиний мощности загрязненных грунтов

Результаты работ показали, что метод георадиолокации может найти широкое применение при решении задач изучения морфоструктурных особенностей техногенных отвалов. Особенно в районах развития многолетней мерзлоты, где часто встречаются недоработки плотика при дражной отработке. Натурные данные георадиолокации показали, что имеется возможность прослеживания границ слоев составляющих отвал пород, отличающихся по электрофизическим свойствам, и проведения более точного пространственного анализа форм отложений на основе классификации типов волновых картин: криогенные структуры, валунистость, инородные включения.

## 4.2 Апробация методики УГС на месторождениях криолитозоны

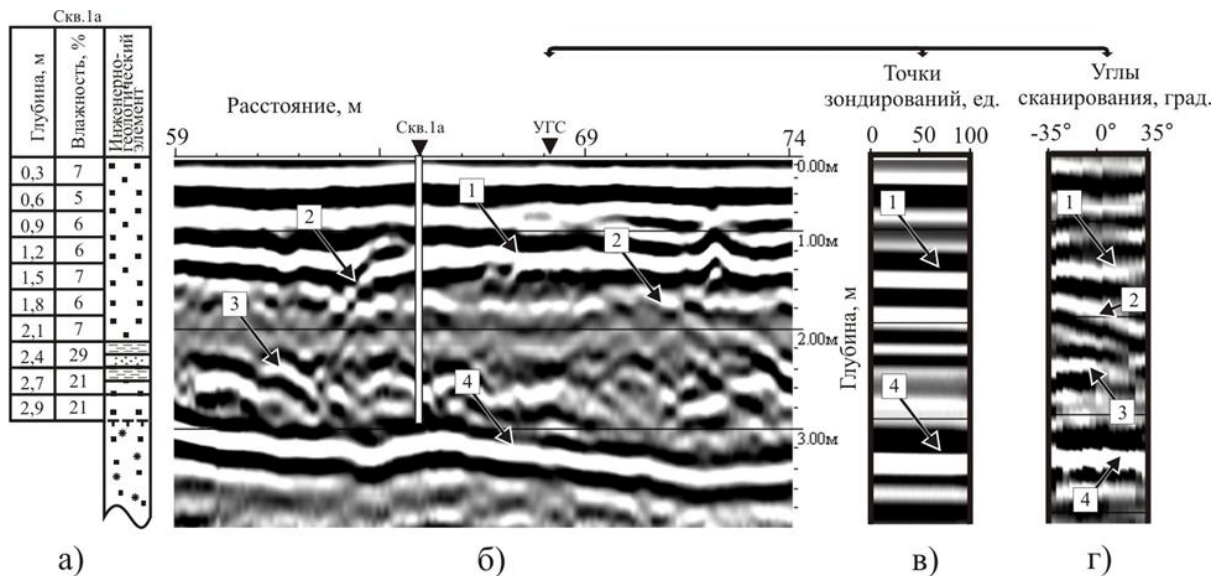
Апробация методики УГС успешно проведена при исследованиях вскрышных пород на угольном разрезе «Кангаласский». Георадиолокационные исследования проведены георадаром «ОКО-2» с модернизированным антенным блоком АБ-250М (центральная частота 250 МГц) [131]. На участке получены данные по методикам профилирования и углового георадиолокационного сканирования (Рисунок 4.16) [87].



Рисунок 4.16 – Участок апробации методики УГС на угольном разрезе «Кангаласский»

При интерпретации использована информация по скважине 1а (Рисунок 4.17а). По данным бурения установлены изменения в геологическом строении рыхлых отложений: обнаружены останки древесины, включения глинистых прослоев, а также кровля мерзлоты. Пробы влажности показали, что появление отражающей границы на глубине 1,4-1,5 м связано с накоплением влаги на этом горизонте. Наибольшее увлажнение в толще сезонноталого слоя (СТС) наблюдается на глинистых прослоях и у кровли многолетней мерзлоты.

Первичная обработка данных углового сканирования включает сборку радарограмм из отдельных файлов и выбор временного окна обработки. Далее осуществляется обработка радарограммы с применением стандартных процедур программного обеспечения георадара.



Условные обозначения:



Рисунок 4.17 – Результат георадиолокационных исследований строения рыхлых отложений вскрышных горных пород угольного разреза «Кангаласский»: а) данные бурения; б) георадиолокационный разрез; в) данные георадиолокационного стационарного зондирования; г) данные углового георадиолокационного сканирования.

По данным профилирования на глубине около 3-х метров выявлена подошва СТС – протяженная ось синфазности, образованная высокоамплитудными сигналами. По таким же признакам она выявлена при стационарном и угловом сканировании. По данным профилирования также прослеживаются локальные неоднородности, связанные с глинистыми включениями и древесными останками, а также граница повышенной влажности на 1,4-1,5 м. Анализ волновой картины углового сканирования, на основе данных компьютерного моделирования, позволяет выделить на радарограмме горизонтальные отражающие границы на глубинах 1,4 и 2,9 м, наклонную границу в пределах 1,5-2,1 м и локальный объект на глубине 2,3 м. Идентификация наклонной границы и локального объекта на радарограмме стационарного зондирования не представляется возможной, т.к. эти отражения такие же, как и отражения от горизонтальных границ.



Описанная методика успешно апробирована на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь для выявления водоносного горизонта и кровли коренных пород [68, 132]. 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 (Рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – Участок апробации методики УГС на месторождении золота р.Аллах-Юнь

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 (Рисунок 4.19) [61].

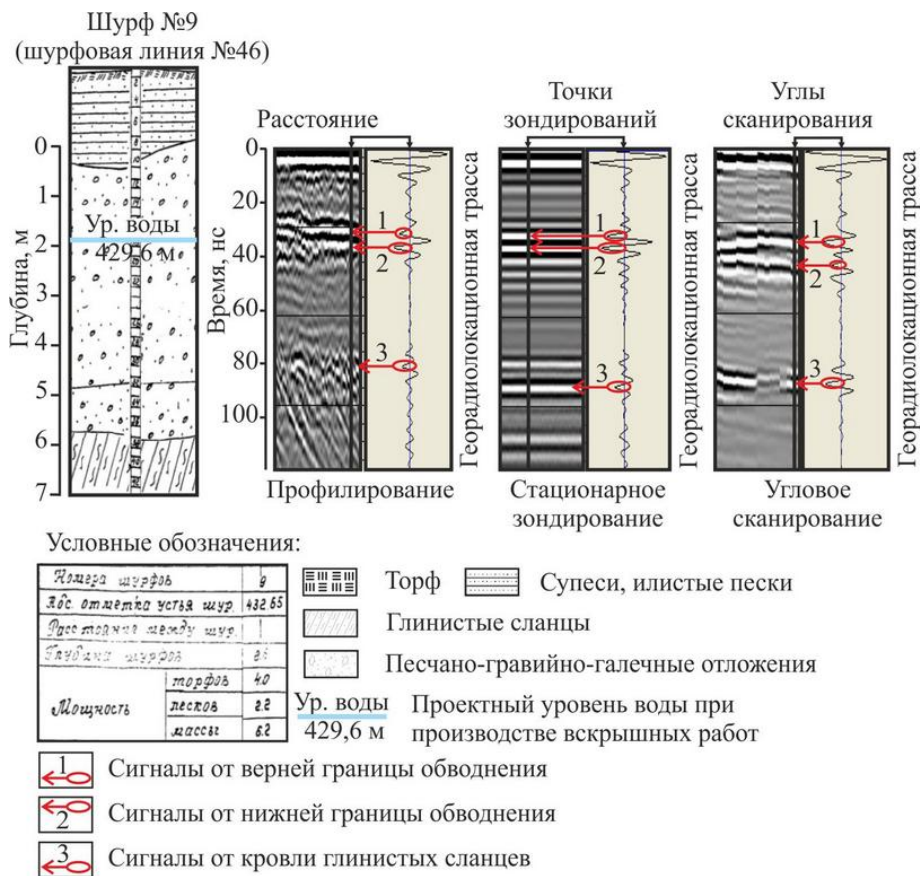


Рисунок 4.19 – Результат применения разработанной методики УГС и сравнение ее данных с профилированием и стационарным зондированием

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, соответствующих верхней и нижней границе водоносного горизонта [117]. Ниже, на глубине 4-5 м можно наблюдать границу кровли коренных пород, образованную волнами дифракции от крупнообломочного материала по всей протяженности радарограммы. В результате накопления сигналов в точке углового сканирования волны дифракции образовали сплошные оси синфазности, что позволило более точно выявить кровлю коренных пород.

Результаты 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.

4.3 Применение методики УГС в комплексе с профилированием при площадных георадиолокационных исследованиях особенностей строения массивов горных пород и грунтов

Возможность эффективного изучения методом георадиолокации особенностей строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны с использованием методик профилирования и углового георадиолокационного сканирования в опорной точке показана на примере описанного выше участка месторождения р. Аллах-Юнь [99].

Георадиолокационные исследования проведены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250 (центральная частота 250 МГц). На участке, подготавливаемом к дражной отработке, получены данные профилирования и углового георадиолокационного сканирования. По линии профиля в двух GPS-привязанных точках выполнены измерения методикой УГС. После обработки данные представлены в виде синтезированной радарограммы длиной около 60 м (Рисунок 4.20). При интерпретации использована информация по ближайшему шурфу (шурф №9, шурфовая линия №46), расположенному на удалении 0,5 км. По всей протяженности профиля волнами дифракции от крупнообломочного материала на глубинах 4-5 м образована граница кровли коренных пород [116]. По данным

профилирования, на глубине около 2-х метров выявлен водоносный горизонт в толще мерзлых песчано-гравийно-галечных отложений. Его распознавание на радарограмме выполнено в соответствии с установленными характеристиками волнового поля – протяженная ось синфазности, образованная высокоамплитудными сигналами, отраженными от верхней границы водоносного горизонта.

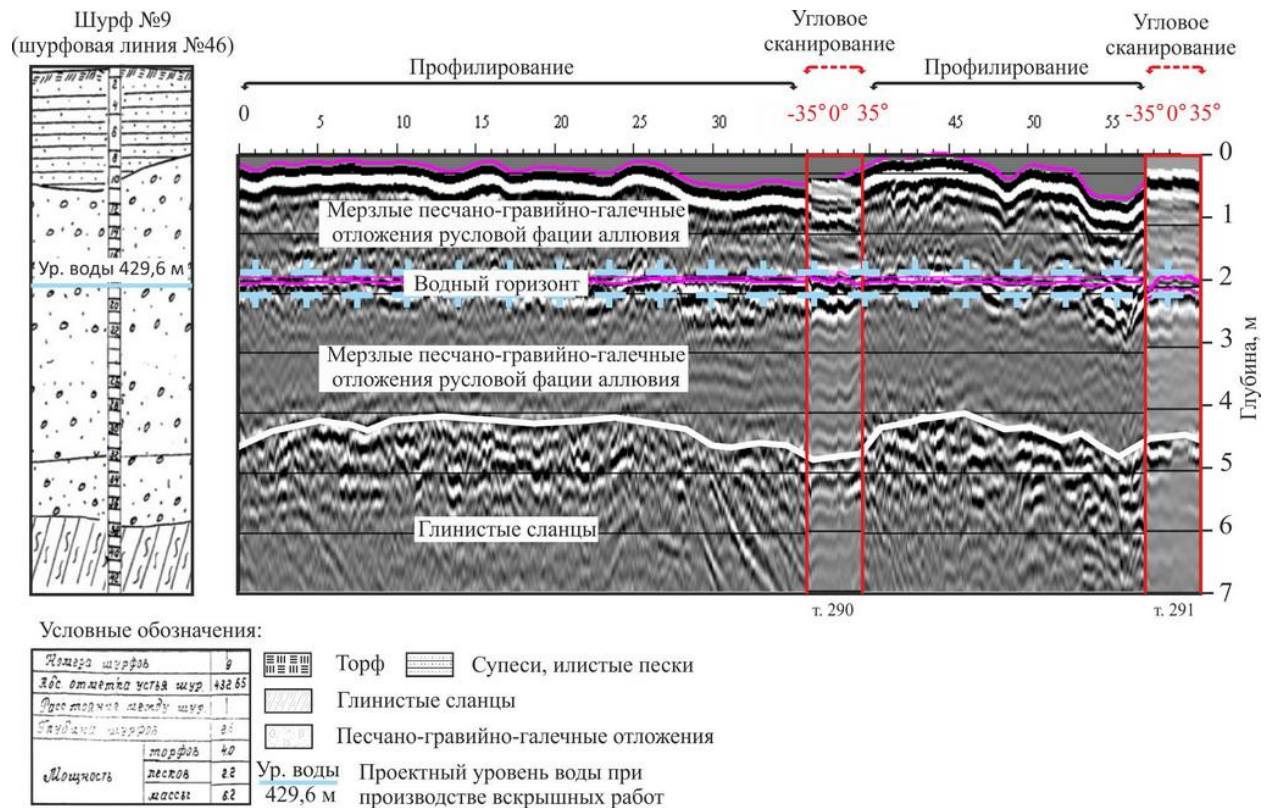


Рисунок 4.20 – Результат изучения строения массива горных пород комплексным применением методик УГС и профилирования

При угловом сканировании в двух точках (GPS-привязка по профилю в т.290 и т.291), 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, соответствующих верхней и нижней границе водоносного горизонта. Хаотично распределенные во временной области и по длине профиля волны дифракции от обломочного материала у

поверхности коренных пород хорошо просматриваются на георадиолокационном разрезе. При УГС эти сигналы образовали протяженные оси синфазности ломаной формы, что позволило уверенно проследить кровлю коренных пород [122, 99].

Дальнейшая апробация комплексирования методик профилирования и углового георадиолокационного сканирования в опорных точках исследований выполнена на территории северной части Якутской алмазодобывающей провинции. Для обеспечения построения 3D-карт, съемка проводится по методике площадного профилирования с равномерным смещением профилей и привязкой координат данных георадиолокационных измерений системой спутникового позиционирования. Для получения информации о геокриологических структурах в межпрофильном пространстве и участках, где профилирование невозможно, выполнение полевых исследований осуществляется в опорных точках по методике УГС.

На рисунке 4.21 представлены результаты сканирования в опорной точке с координатной привязкой к местности, в окрестности скважины №3/7 (скважина на 7-ом метре по профилю №3). Записано 1,5 тыс. точек зондирования в секторе семьдесят градусов антенным блоком «АБ-250М» с шагом угловых положений пять градусов.

Радарограмма УГС обработана стандартными процедурами программного обеспечения GeoScan32, а интерпретация выделенных границ 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.

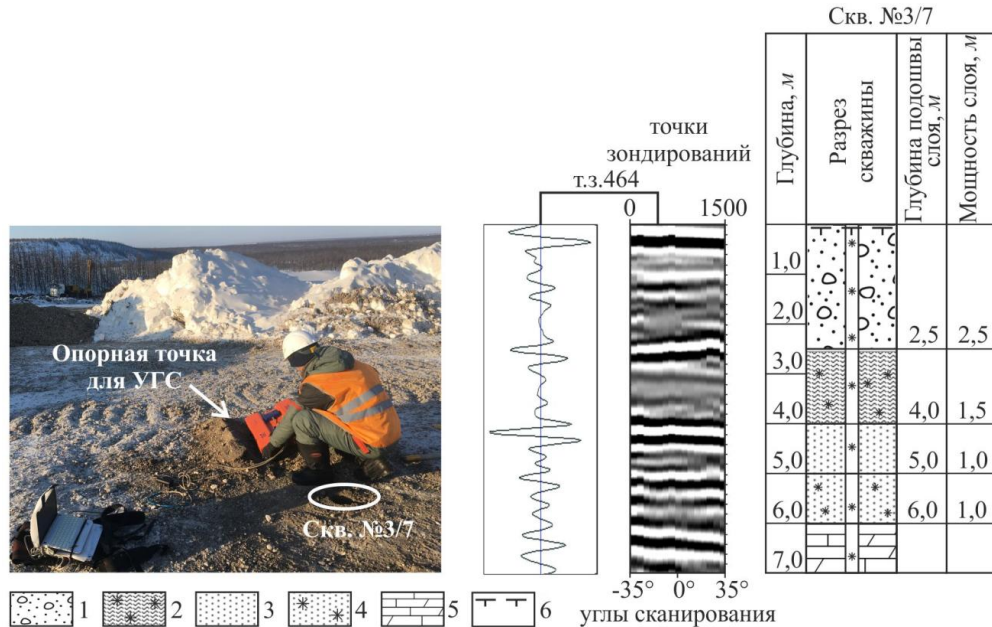


Рисунок 4.21 – Данные полевых исследований по методике УГС в опорной точке, рядом со скважиной №3/7: 1 – мерзлые песчано-гравийно-галечные отложения; 2 - высокольдистые илисто-глинистые отложения; 3 - суглинок темно-серый мерзлый; 4 - суглинок темно-серый с включением льда; 5 – доломиты; 6 – кровля мерзлых 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 (Рисунок 4.22а). 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 илисто-глинистыми отложениями имеет в волновом образе хаотичные сигналы относительно высоких амплитуд (область сигналов обозначена пунктирными линиями на рисунке 4.22а). Такие волновые поля могут соответствовать нарушенной криогенной структуре суглинков в результате их растепления [94].

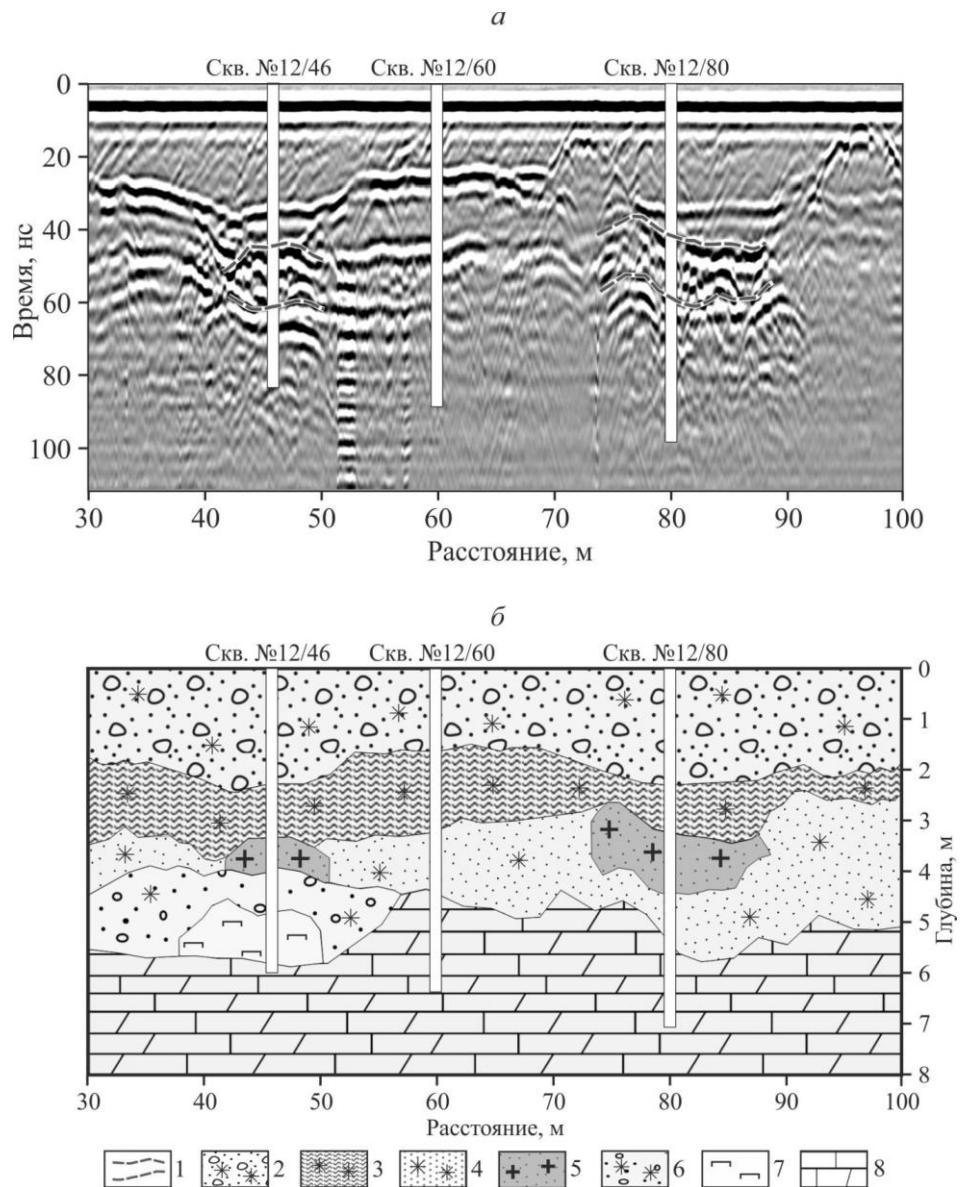


Рисунок 4.22 – Выявление зон талых горных пород по данным георадиолокации и бурения: (а – временной разрез; б – глубинный интерпретационный разрез): 1 – границы зон талых пород на радарограмме; 2 – мерзлые песчано-гравийно-галечные отложения; 3 – высокольдистые илисто-глинистые отложения; 4 – суглинок темно-серый мерзлый; 5 – суглинок темно-серый талый; 6 – песок льдистый мелкий с галечником; 7 – подземный лед; 8 – доломиты

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 Скв. №12/46 на глубинах 3,1 – 4,0 м;

Скв. №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 рисунке 4.22б. Для расчета глубинного разреза исследуемого участка, сопоставлением данных бурения и времени задержки георадиолокационных сигналов, определены средние значения относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) 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 4.23. 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, на участке, незатронутом линиями профилей (Рисунок 4.24). 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 три потенциальные зоны обнажения талых пород по борту. Однако при использовании данных из опорной точки достоверность картирования повышается. Одна большая талая зона «разбивается» на две части, с отдельными выходами на борт карьера. По данным георадиолокации площадь талых пород на обследуемом участке составила около 1600 м<sup>2</sup>. Для заверки геофизических данных по некоторым профилям дополнительно пробурены скважины.



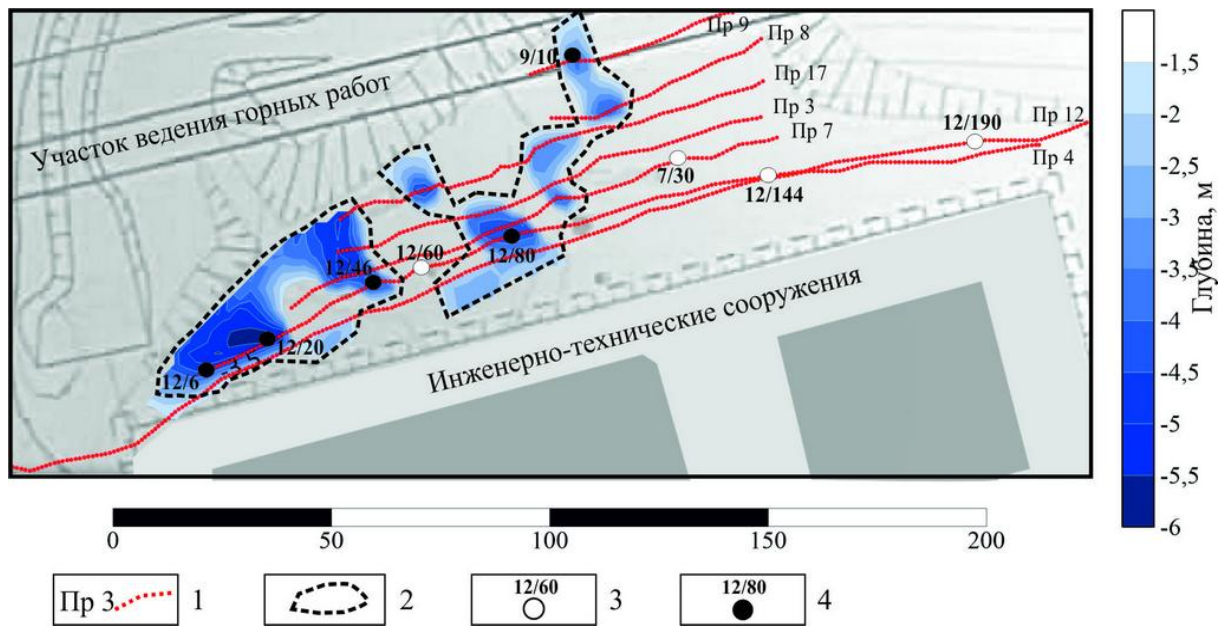


Рисунок 4.23 – Карта распространения талых горных пород по участку, на основе данных равномерно распределенных линий профилей: 9 - георадиолокационный профиль; 10 - контур талых горных пород; 11 - скважина с мерзлыми горными породами; 12 - скважина с талыми горными породами; 13 - опорная точка УГС со скважиной

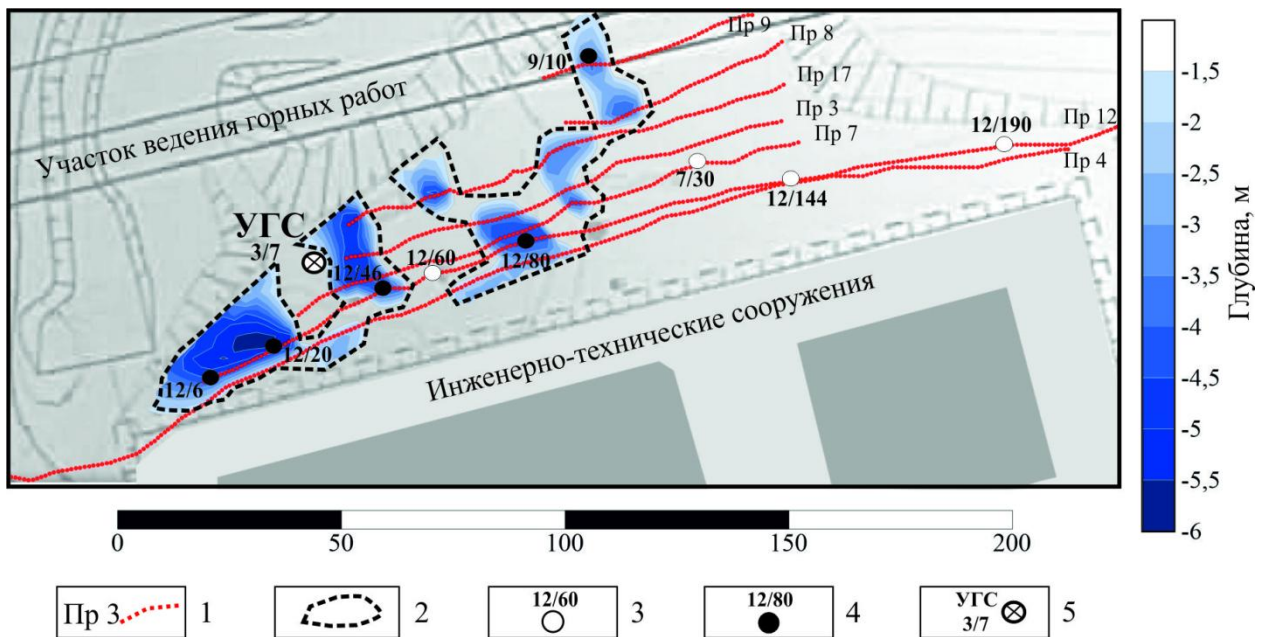


Рисунок 4.24 – Карта распространения талых горных пород по участку, на основе данных равномерно распределенных линий профилей и УГС в опорной точке: 9 - георадиолокационный профиль; 10 - контур талых горных пород; 11 - скважина с мерзлыми горными породами; 12 - скважина с талыми горными породами; 13 - опорная точка УГС со скважиной

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.

Апробация методики картирования также выполнена на ГОК «Инаглинский». На рисунке 4.25 представлены результаты сканирования в опорной точке на обследуемом участке, отсыпанном рыхлым грунтом (щебнем) под строительство инженерно-технического объекта. Записано 1,5 тыс. точек зондирования в секторе семьдесят градусов антенным блоком «АБ-250М» с шагом угловых положений пять градусов. После предварительной подготовки, радарограмма УГС обработана стандартными процедурами программного обеспечения GeoScan32 (НПО «Логис-Геотех», Россия), а интерпретация выделенных границ основана на априорной информации. Геологическое основание из суглинков отсыпано щебнем. Мощность отсыпки по площади неравномерна из-за неровности первоначального рельефа. По данным УГС уверенно прослеживаются слои слагающие массив. Мощность отсыпки щебнем в опорной точке составила 2,8 м. Ее граница на волновой картине представлена протяженной осью синфазности, а толща отсыпки в виде прерывистых осей синфазности, образованных отражением от крупнообломочного материала.

На волновом поле георадиолокационного профилирования (Рисунок 4.26) прослежены слои: щебня, мощностью более 3-х метров; скопления валунов на отрезке 22-61 м; суглинка. Отрисована подошва отсыпки мощностью 1,5-3 м. Глубинный разрез построен с учетом среднего значения относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) пород: 7. Значение определено методически по волнам дифракции от локальных объектов (валунов). Участок скопления валунов на радарограмме отображается контрастными волнами дифракции (гиперболами различных размеров).

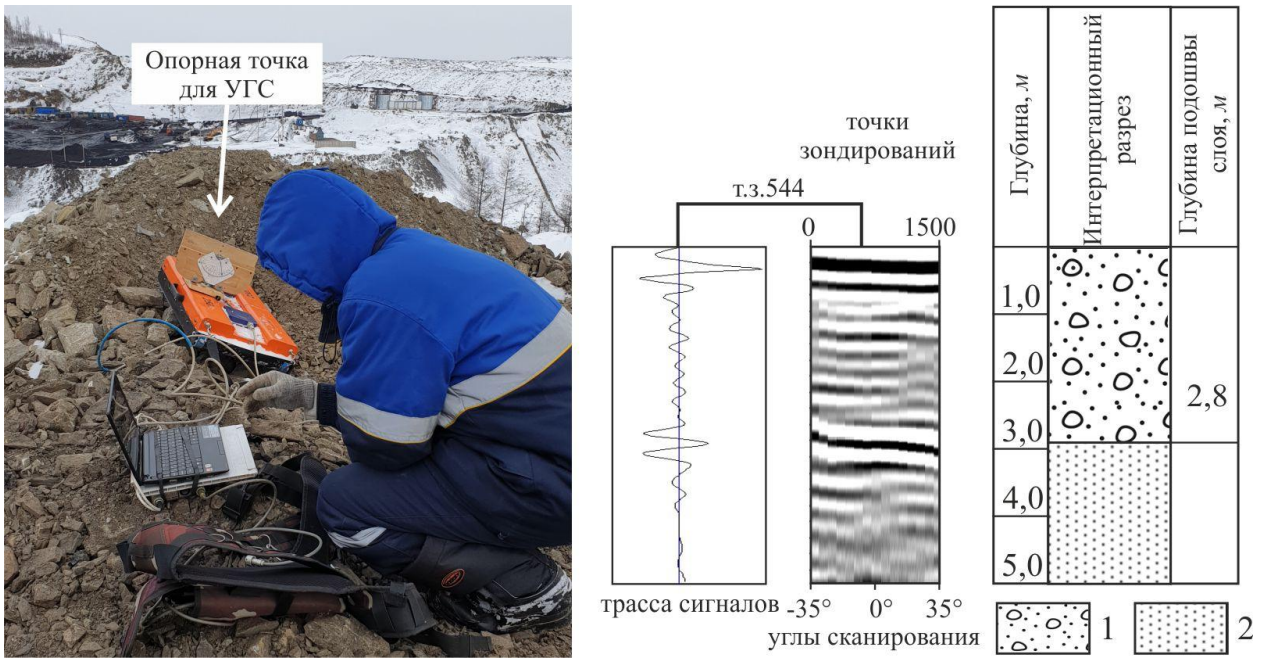


Рисунок 4.25 – Данные полевых исследований по методике УГС в опорной точке: 1 - щебень; 2 - суглинок; УГС - угловое георадиолокационное сканирование; т.з.544 - точка зондирования

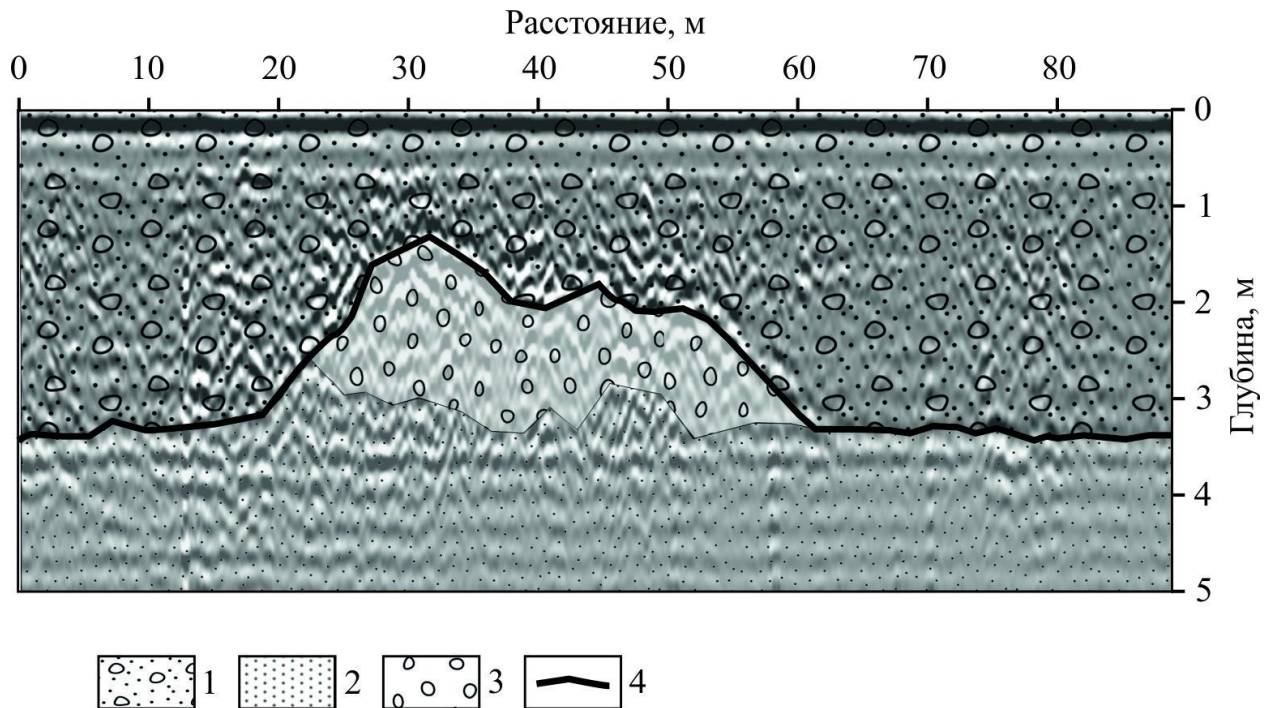


Рисунок 4.26 – Интерпретационный разрез по данным георадиолокации: 1 - щебень; 2 – суглинок; 3 - валуны, щебень, 4 - подошва отсыпки щебнем

Линии профилей сориентированы в одном направлении и координатами привязаны к местности, но из-за особенностей поверхности участка (скопление валунов и крупнообломочного материала) профили 10 и 15 разошлись (Рисунок 4.27). По таким крупным глыбам перемещение георадара невозможно, в результате образовалась неохваченная георадиолокацией площадка. Поэтому опорная точка для уточнения картирования установлена между профилями 10 и 15. По результатам обработки данных площадной съемки построены две карты рельефа основания отсыпки, а также их 3D визуализация (Рисунок 4.28). Трехмерные блочные изображения помогают определить горизонтальную и вертикальную протяженность, геологических структур горного массива, а также направление их распространения. Максимальная глубина исследований составила 4,5 м. При учете данных УГС, изолинии: -1,5; -2; -2,5 – изменили свое направление, и уточнили конфигурацию основания отсыпки (Рисунок 4.28).



Рисунок 4.27 – Георадиолокационные площадные исследования на участке, ограниченном скоплением валунов и крупнообломочного материала

Таким образом, показано, что данные УГС в опорной точке могут существенно дополнить данные профилирования при площадных исследованиях в условиях пересеченной и ограниченной местности.

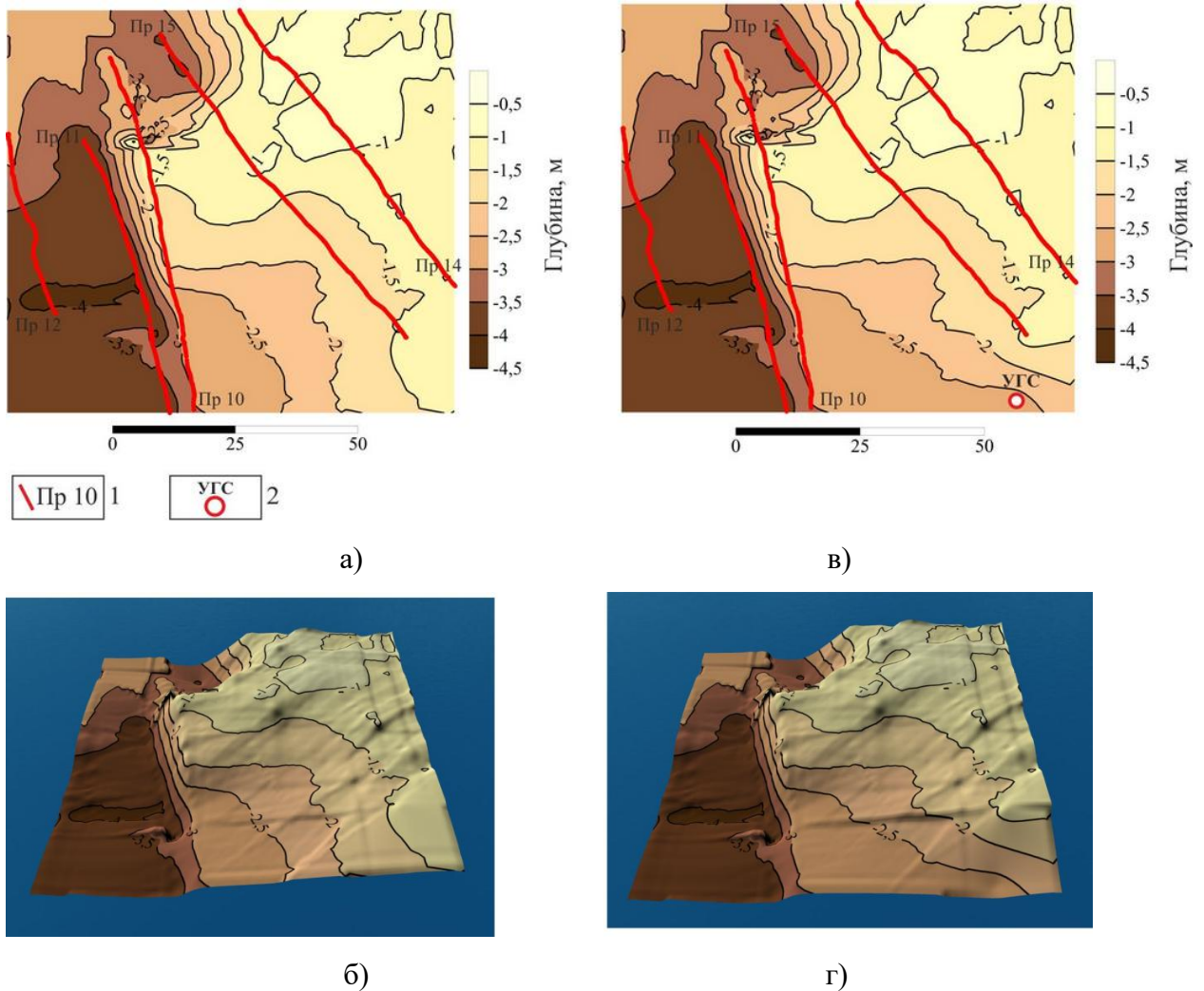


Рисунок 4.28 – Карта мощности отсыпки по данным георадиолокационного профилирования (а) и 3D визуализация рельефа основания отсыпки (б). Карта мощности отсыпки по данным георадиолокационного профилирования в комплексе с УГС (в) и 3D визуализация рельефа основания отсыпки с уточнением по данным УГС (г): 1 - георадиолокационный профиль; 2 - опорная точка.

## ВЫВОДЫ

По данным георадиолокационных исследований на месторождениях криолитозоны выявлены талые и обводненные зоны в массиве. Показана возможность дистанционного картирования обводненности взрывных блоков. Полученные результаты могут помочь в выборе рациональных

параметров вскрышных работ: выбор глубины скважин, их расположение и расстояние между ними, типа взрывчатого вещества, его мощности.

Установлено, что при площадных исследованиях дражных полигонов с водной поверхности необходима синхронизация георадиолокационных и GPS-данных, а план профилей нужно заносить в GPS-приемник до начала работ, т.к. навигация на водоеме без ориентиров затруднительна.

Показано, что площадные исследования не всегда можно выполнить по равномерной сети параллельных или ортогональных профилей. Поэтому в условиях пересеченной и ограниченной местности площадные исследования проводят по сети нерегулярных профилей, а незатронутые профилированием участки изучают в опорных точках по методике УГС. Разработанная методика углового георадиолокационного сканирования обеспечивает повышение информативности исследований строения горного массива в сложных горно-технологических условиях действующих месторождений криолитозоны. Ее применение на участке ведения вскрышных работ месторождения р. Аллах-Юнь, в составе георадиолокационных исследований методикой профилирования, позволило выявить, на фоне множества дифрагированных на валунах и гальке волн, кровлю коренных пород, верхнюю и нижнюю границу обводнения в толще рыхлых отложений мерзлого массива, тем самым повысило информативность и детализацию георадиолокационного разреза. Апробация площадных исследований с использованием методики УГС в опорной точке выполнена на участке ведения вскрышных работ при выявлении талых зон, а также при изучении строения отсыпанной площадки под инженерно-техническое сооружение. По результатам сопоставления карт, построенных по данным только профилирования, и карт, построенных на основе комплексных данных профилирования и УГС, установлено, что информация в опорной точке существенно уточнила картирование талых зон и рельеф основания отсыпки, 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 и ограниченной местности, 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, усложняющими 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 и количество трасс в каждом угловом положении, режим записи; последовательность обработки файлов различных угловых положений.
7. Разработана и предложена методика углового георадиолокационного сканирования для изучения строения и состояния массивов горных пород из одного местоположения в условиях ограниченного пространства. 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 при отработке 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.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чернихов, Ю. Патент DE165546 Кристиана Хюльсмайера / Ю. Чернихов // Наука и техника - журнал для перспективной молодёжи. – 2015. – № 12. – С. 62 – 64. – URL: <https://rucont.ru/efd/400947> (дата обращения: 22.09.2022).
2. Lowy, H. Eine electrodynamische Methode zur Erforschung des Erdinneren (Zweite Mitteilung) / H. Lowy, G. Leimbach // Phys. Zeitschrift, 1912. - Bd. 13. - № 9. – P.397 – 404.
3. Annan, A. P. GPR - Trends, History, and Future Developments// Subsurface Sensing Technologies and Applications, 2002. – Vol. 3. – No. 4. – 18 P. URL: <https://www.sensoft.ca/wp-content/uploads/2015/11/GPR-trends-history-future-developments.compressed.pdf> (дата обращения 22.08.2022).
4. Ним Ю. А., Омеляненко А. В., Стогний В. В. Импульсная электроразведка криолитозоны. – Новосибирск: Наука, 1994. – 188 с.
5. Мачерет, Ю. Я. Радиолокационное зондирование ледников Шпицбергена с вертолета / Ю. Я. Мачерет, А. Б. Журавлев // Материалы гляциологических исследований. – 1980. – Вып. 37. – С.109 – 131.
6. Богородский, В. В. Радиолокационные измерения толщины залежей торфа и сапропели / В. В. Богородский, Г. В. Трапов // Журнал технической физики. – 1979. – Т. 49, Вып. 3. – С. 670 – 673.
7. Власов, О. П. Радиолокационное зондирование мерзлых грунтов с борта самолета / О. П. Власов, В. И. Горный, В. А. Кутеев, М. И. Финкельштейн // Известия вузов - Геология и разведка. – 1978. – № 5. – С. 145 – 148.
8. Финкельштейн, М. И. Практическое применение метода радиолокационного зондирования в задачах детальной разведки месторождений торфа и гидрорежимных наблюдений на территории Латвийской ССР / М. И. Финкельштейн, В. П. Золотарев, А. Я. Биргер, Л. Я. Буш // Известия АН Латвийской ССР - Физические и технические науки. – 1982. – № 5. – С. 83 – 87.

9. Финкельштейн, М. И. Радиолокационное подповерхностное зондирование торфяного грунта / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, О. П. Власов // Доклады Академии наук СССР. – 1979. – Т. 219, № 6. – С. 1427 – 1429.
10. Финкельштейн, М.И., Менднльсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов / М. И. Финкельштейн, В.Л. Менднльсон, В.А. Кутев. // М.: Советское радио.– 1977. – 178 с.
11. Техническое описание и инструкция по эксплуатации на Георадар «ОКО-2». – Режим доступа / URL: [https://geodevice.uz/upload/iblock/2d4/OKO2-Search\\_kit\\_manual-ru.pdf](https://geodevice.uz/upload/iblock/2d4/OKO2-Search_kit_manual-ru.pdf) (дата обращения 22.09.2022).
12. Руководство пользователя программой GeoScan32. – Режим доступа / URL: [https://geodevice.ru/upload/iblock/05c/rje\\_geoscan\\_v.02.12.2020.pdf](https://geodevice.ru/upload/iblock/05c/rje_geoscan_v.02.12.2020.pdf) (дата обращения 22.09.2022).
13. Программный комплекс для автоматизированной обработки георадиолокационных данных «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ» [Электронный ресурс] – Режим доступа / <https://www.georadar-expert.ru> (дата обращения 22.09.2022).
14. ООО «Геодевайс» [Электронный ресурс] – Режим доступа / <https://geodevice.ru/software/gpr-software/> (дата обращения 22.09.2022).
15. Wilchek, Lori-Ann Ground penetrating radar for detection of rock structure // University of Alberta. – 2000. – 284 P.
16. Александров П. Н. Теоретические основы георадарного метода / М.: Физматлит. – 2017. – 112 с.
17. Финкельштейн, М. И. Радиолокационные аэроледомерные съемки рек и озер водохранилищ / М. И. Финкельштейн, Э. И Лазарев, А. Н. Чижов. – Л. : Гидрометеоиздат. – 1984. – 117 с.
18. Ground penetrating radar for utility location [Электронный ресурс] – Режим доступа / <http://www.safesitellc.com/ground-penetrating-radar-utility-location> (дата обращения 22.09.2022).

19. Annan, A. P. and J. L. Davis. Impulse Radar Sounding in Permafrost. // Radio Science — 1976. Vol. 11. – № 4. – p. 383–394.
20. Богородский, В. В. Радиогляциология / В. В. Богородский, Ч. Бентли, П. Л. Гудмансен. – Л. : Гидрометеиздат. – 1983. – 306 с.
21. Мачерет, Ю. Я. Радиозондирование ледников / Ю. Я. Мачерет. – М. : Научный мир. – 2006. – 392 с.
22. Владов, М. Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений / М. Л. Владов, М. С. Судакова. – М. : ГЕОС. – 2017. – 240 с.
23. 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. Омеляненко, М. Р. Никифорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 305 – 309.
24. Калашник, А. И. Подповерхностное георадарное зондирование горно-геологических сред Кольского полуострова / А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, А. Ю. Дьяков, А. Ю. Демахин // Вестник Московского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С.576 – 582.
25. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых.– М.: ГКЗ.– 1997.– 16 с.
26. Методические рекомендации по применению классификации запасов твердых полезных ископаемых к россыпным месторождениям. – М. : ГКЗ, 2000. – 65 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа / <https://www.geokniga.org/books/2490> (дата обращения 22.09.2022).
27. Минорин, В. Е. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Кн. 2 : Россыпные месторождения / В. Е. Минорин, В. М. Подчасов, И. Я. Богатых, С. А. Граханов, В. И. Шаталов. – Якутск : ЯФ ГУ «Издательство СО РАН». – 2004. – 424 с.

28. Соколов, К. О. Применение георадиолокации для изучения геомеханических свойств горных пород на россыпных месторождениях Севера / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий, Д. В. Хосоев // Горная промышленность. – 2015. – № 4 . – С. 62 – 63.
29. Омеляненко, А. В. Геофизическое картирование подповерхностных геологических структур криолитозоны / А. В. Омеляненко, Д. В. Саввин, Н. Д. Прудецкий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 12. – С. 108 – 116.
30. 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.
31. Loveson, V.J. Application of ground penetrating radar in placer mineral exploration for mapping subsurface sand layers: a case study / V. J. Loveson, R. P. Barnwal, V. K. Singh, A. R. Gujar, G. V. Rajamanickam // Developmental planning of placer minerals. Allied Publications. – New Delhi.– 2005.– P. 71 – 79.
32. Francke, J. Advances in long-range GPR systems and their applications to mineral exploration, geotechnical and static correction problems / J. Francke V. Utsi // Mining Geoscience. – 2009. – Vol. 27. – P. 85 – 93.
33. Федорова, Л. Л. О возможности применения георадиолокации при подготовке и отработке дражных полигонов / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2010. – № 9. – С. 380 – 383.
34. Барышников В. Д., Хмелинин А. П., Денисова Е. В. Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 30–38.
35. Соколов К. О., Федорова Л. Л., Саввин Д. В., Стручков А. С. Обоснование структуры и функциональности алгоритмического

- обеспечения георадиолокационного мониторинга влажности горных пород криолитозоны // *Фундаментальные исследования*. — 2017. — № 9. — С. 93–98.
36. Судакова, М. С. Современные направления георадиолокации / М. С. Судакова, М. Л. Владов // *Вестник Московского университета. Серия 4 : Геология*. – 2018. – № 2. – С. 3 – 12.
37. Мельников, Н. Н. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, А. Ю. Дьяков, Д. А. Максимов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2016. – № 1. – С. 39 – 49.
38. 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.
39. Куляндин Г. А. Георадиолокационная технология для решения горно-геофизических задач на алмазоносных месторождениях криолитозоны / Г. А. Куляндин, А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова // *Проблемы комплексного освоения георесурсов : материалы III Международной научной конференции (г. Хабаровск, 16-18 сентября 2009 г.)*. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2010. – Т. 4. – С. 55 – 59.
40. Великин, С. А. Геофизические исследования при изучении инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород восточного карьера “Нюрбинский” (Западная Якутия) / С. А. Великин, Ю. Л. Марченко, К. И. Бажин // *Вестник КРАУНЦ - Науки о Земле*. – 2015. – № 3. Вып. № 27. – С. 35 – 46.
41. Дьяков, А. Ю. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов / А. Ю. Дьяков, А. И. Калашник. – Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2021. – 110 с. : ил.

42. Федорова, Л. Л. Особенности обработки георадиолокационных данных при исследовании структуры геологических разрезов россыпных месторождений / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно аналитический бюллетень. Отд. вып. Дальний Восток. – 2009. – № 4. – С. 99–105.
43. Патент 40 №2490671 Российская Федерация, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород / Нерадовский Л. Г ; заявитель и патентообладатель Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. – №2011125238/28 ; заявл. 17.06.2011 ; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. – 11с.
44. Туренко, С. К. О системном подходе к повышению эффективности исследований объектов криолитозоны геофизическими методами / С. К. Туренко, К. В. Дружинина // Известия высших учебных заведений - Нефть и газ. – 2018. – № 2. – С. 27 – 31.
45. Патент 6094157 США. Oblique scanning ground penetrating radar / Dennis H. Cowdrick. Опубл. 25.07.2000. [Электронный ресурс] – Режим доступа / <https://patents.google.com/patent/US6094157A/en> (дата обращения 22.08.2022).
46. Суханов, Д. Я. Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, вып. 7. – С. 64 – 68.
47. Патент 46 7755360 B1 США. Portable locator system with jamming reduction / Michael J. Martin. Опубл. 13.07.2010. [Электронный ресурс] – Режим доступа / <https://patents.google.com/patent/US7755360B1/en> (дата обращения 22.08.2022).
48. Патент 47 6388629 B1 США. Rotating scanning antenna apparatus and method for locating buried objects / Paul Albats, Jr., Macyln Burns, Mark Dalton, Anthony DeRubeis, Cliff Evans, JakobHaldorsen, Thorkild Hansen, Douglas E. Miller, Michael L. Oristaglio. Опубл. 14.05.2002. [Электронный ресурс] – Режим доступа /

<https://patents.google.com/patent/US6388629B1/en> (дата обращения 22.08.2022).

49. Омеляненко, А. В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород : монография / А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН. – 2006. – 136 с.
50. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований / сост. : М. Л. Владов, В. П. Золотарев, А. В. Старовойтов – М. : ГСД Продакшен, 1997. – 66 с. [С. 21 – 22].
51. Лещанский, Ю. И. Радиофизические свойства сред: песчаного и глинистого грунтов, строительных материалов : коллективная монография / Ю. И. Лещанский, А. И. Дробышев, Д. П. Посевин ; под ред. А. Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с. [С. 408 – 409 : Вопросы подповерхностной радиолокации].
52. Пересчет утвержденных запасов для открытой раздельной добычи в запасы для дражной добычи россыпного месторождения р. Аллах-Юнь (участок Мост) по имеющимся кондициям и сопровождение их утверждения в ТКЗ Республики Саха (Якутия) : отчет о НИР / ОАО «Иргиредмет»; рук. Дементьев В.Е. ; исполн. : Гурулев В.С. [и др.]. – Иркутск, 2011. – [С.12 – 43]
53. Семейкин, Н. П. Развитие георадаров серии «ОКО» : коллективная монография / Н. П. Семейкин, В. В. Помозов, А. В. Дудник ; под ред. А. Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с. [С. 231 – 235 : Вопросы подповерхностной радиолокации].
54. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию : учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
55. Патент № 2561769 Российская Федерация, МПК G01V 3/12 (2006.01). Способ георадиолокации в условиях ограниченного пространства / Куляндин Г. А., Омеляненко А. В. ; заявитель и патентообладатель Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – №

2014117846/28 ; заявл. 29.04.2014 ; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25. – 4 с. : ил.

56. Куляндин, Г. А. Основы методики углового сканирования горных пород георадаром / Г.А. Куляндин, П.А. Омеляненко // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: сборник тезисов XI Междунар. геофиз. науч.-практ. семинара / г. Санкт-Петербург, (12-13 ноября 2013.). – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – С. 88 – 90.
57. Kulyandin, G. A., Omelyanenko A. V., Omelyanenko P. A. Methods of GPR Angular Scanning // GPR 2014 : 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. – Brussels, 2014. – P. 571 – 574.
58. Патент № 141971 Российская Федерация, МПК G01S 13/88 (2006.01). Антенный блок георадара / Куляндин Г. А., Омеляненко 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. – с. 1. : ил.
59. Harry, M. J. Ground penetrating radar: theory and applications, Elsevier, 2009. 524 p. // URL: <https://www.elsevier.com/books/ground-penetrating-radar-theory-and-applications/jol/978-0-444-53348-7> (дата обращения 18.08.2022).
60. Lampe, B., Holliger, K., Green, A. G. A finite-difference time-domain simulation tool for ground-penetrating radar antennas. Geophysics. 2003. – Vol. 68. no. 3. – P. 971 – 987. // URL: [https://www.researchgate.net/publication/228077848\\_A\\_finite-difference\\_time-domain\\_simulation\\_tool\\_for\\_ground-penetrating\\_radar\\_antennas](https://www.researchgate.net/publication/228077848_A_finite-difference_time-domain_simulation_tool_for_ground-penetrating_radar_antennas) (дата обращения 18.08.2022)
61. 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.
62. Куляндин, Г. А. Лабораторные устройства к антенным блокам георадара для моделирования углового сканирования // Проблемы горных наук: взгляд молодых ученых : материалы Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика РАН Николая Васильевича Черского (г. Якутск, 24-26 марта 2014 г.). – Якутск, 2014. – С. 54 – 59.
63. Титов, А. В. Физическое и математическое моделирование распространения георадарных сигналов в пресноводных водоемах / А. В. Титов, Н. Ю. Бобров, С. С. Крылов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций, МОСКВА, 07–09 декабря 2016 года. – МОСКВА: ООО Геомаркетинг, 2016. – С. 350-356.
64. Warren, C., Giannopoulos, A., Giannakis, I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications – Vol. 209. – December 2016. – pp. 163-170.
65. Матвеев, А.Н. Оптика: Учебное пособие для физических специальностей ВУЗов. М.: «Высшая школа». – 1985. – 351 С.
66. Лаломов, Д. А. Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных / Д. А. Лаломов, В. В. Глазунов // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 1. – С. 69-77.
67. Владов М. Л., Пятилова А. М. Оценка поглощающих свойств среды при георадиолокационных исследованиях в лабораторных условиях. // Геофизика, — 2015. – №.6. – С. 69–75.
68. 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.
69. Нерадовский, Л. Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации / Л.Г. Нерадовский. - М.: РАН. – 2009. – 337 с.
  70. Куляндин, Г. А., Федоров М. П. Выявление структурных изменений в коренных породах методом георадиолокации (на примере месторождения «Джекконда») / Г. А. Куляндин, М. П. Федоров // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, (5 – 7 апреля 2017 г.). – 2017. – С. 451 – 454.
  71. Федорова, Л. Л. Георадиолокационное картирование структурных неоднородностей массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Д. В. Саввин, М. П. Федоров // ГИАБ. – 2014. – №11. — С. 267–273.
  72. Исследование и разработка эффективных конструктивных и технологических параметров подземной и открытой геотехнологии, методов освоения недр криолитозоны : отчет о НИР (закл.). Номер проекта в ИС 0297-2019-0041 / Ткач С.М. – Якутск : Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского, 2020. – 94 с. : прил. – [23 – 36].
  73. Соколов, К. О. Алгоритм обработки данных георадиолокационных измерений и бурения скважин (проходки шурфов) для подготовки трехмерной модели геокриологических структур / К. О. Соколов, А. А. Федоров // Известия УГГУ. – 2021. – №4 (64). – С. 88 – 94.
  74. Daniels, J. J Ground Penetrating Radar Fundamentals. Appendix to a Report to the U.S.EPA, Region V. – 2000. –20 P.
  75. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие. — М.: Издательство МГУ, 2008. — 192 с.
  76. Нерадовский, Л. Г. Возможности динамической георадиолокации в комплексе с другими методами геофизики при решении задач

инженерно-геологических изысканий / Л. Г. Нерадовский, С. А. Великин // Инженерная геология. – 2008. – № 3. – С. 52-60.

77. Набатов, В. В. Использование информационной энтропии в качестве идентификатора выявления строения массива горных пород с помощью низкочастотных георадаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 2. – С. 190-200.
78. 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 // GPR-2014: Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, June 30 - July 4, 2014.- P. 297-300. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6970432>
79. Федоров, В. Н., Федорова Л. Л. Электродинамическое моделирование структурных особенностей массива горных пород россыпных месторождений при георадиолокации // Известия вузов. Физика. — 2015. Т. 58, № 8/2. С. 48–51.
80. Куляндин, Г. А. Определение мощности галле-эфельных отвалов на россыпном месторождении золота непрерывным георадиолокационным зондированием // Материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, посвященной 20-летию ТИ (ф) ФГАОУ ВПО “СВФУ”, г. Нерюнгри, 5-7 апреля 2012 г. Секции 1 – 5. – С. 68 – 71.
81. Гаврилов, В. Л. Оценка состояния открытой разработки угольных месторождений центральной и северной Якутии / В. Л. Гаврилов, С. А. Ермаков, Д. В. Хосоев // ГИАБ. – 2010. – № 11. – С. 29 – 36.
82. Корректировка горно-транспортной части проекта реконструкции разреза “Кангаласский” (пересмотр 2001 г.): проектная документация 4633-ИОС 1.2. – Владивосток: Мечел, ОАО “ДальвостНИИпроектуголь”, 2010. – Т. 3. – 118 с.
83. 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).

84. Федорова, Л. Л. Георадиолокационная оценка влажности горных пород / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, К. О. Соколов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2017. – № 8. – С. 152 – 158.
85. Федорова, Л. Л. Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Наука и образование. – 2017. – № 4. – С. 81 – 85.
86. Федорова, Л. Л. Исследование изменения параметров георадиолокационных сигналов в процессе оттайки мерзлых дисперсных горных пород различной влажности / Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин // Наука и образование. – 2016. – № 3 – С. 42 – 46.
87. 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.
88. 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.
89. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования горно-геологических условий дражных полигонов /Л. Л. Федорова, К.О. Соколов, Г.А. Куляндин // Горн. журн. – 2015. – №4.– С. 10 – 14.
90. Ковлеков, И. И. Техногенное золото Якутии : монография / И. И. Ковлеков. – М. : Изд-во Мос. гос. горн. ун-та, 2002. – 303 с.
91. Omelyanenko, A.V. and Khristoforov, I.I. Double spectral GPR method for

- sensing of flooded geological environment. // Science and Education, 2013 (1): 33–38.
92. 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.
93. 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).
94. 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.
95. Финкельштейн, М. И. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн, В. И. Карпухин, В. А. Кутев, В. Н. Метелкин. – М. : Радио и связь, 1994. – 216 с.
96. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации : учебное пособие. / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский. – М. : Изд-во «Горная книга», Изд-во Московского государственного горного университета. – 2008. – 196 с.
97. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография ; под ред. А. Ю. Гринева. – М. : Радиотехника, 2005. – 416 с.
98. Ковлеков, И. И. Техногенное золото Якутии : монография / И. И. Ковлеков. – М. : Изд-во Мос. гос. горн. ун-та, 2002. – 303 с.
99. Куляндин, Г. А. Георадиолокационные исследования геокриологических объектов массива горных пород месторождений криолитозоны / Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова, Е. Э. Соловьев, К. О. Соколов // Горн.

журнал. – 2019. – № 2. – С. 38 – 42.

100. Lejzerowicz, A. Internal architecture of fluvial deposits and the morphology of the selected sections of Narew River valley in Warsaw area (central Poland) based on GPR investigations // 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil. - 2018. - pp. 1-4
101. Neal, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress // Earth-Science Review. - 2004. - vol. 66. - pp. 261-330.
102. Sambrook Smith, G. H., Ashworth, P. J., Best, J. L., Woodward, J., Simpson, C. J. The sedimentology and alluvial architecture of the sandy braided South Saskatchewan River, Canada // Sedimentology. - 2006. - vol. 53. - pp. 413-434.
103. Ashworth, P. J., Sambrook Smith, G. H., Best, J. L., Bridge, J. S., Lane, S. N., Lunt, I. A., Reesink, A. J. H., Simpson, C. J., Thomas, R. E. Evolution and sedimentology of a channel fill in the sandy braided South Saskatchewan River and its comparison to the deposits of an adjacent compound bar // Sedimentology. - 2011. -vol. 58. - pp. 1860-1883.
104. Wooldridge, C. L., Hickin, E. J. Radar architecture and evolution of channel bars in wandering gravel-bed rivers: Fraser and Squamish rivers, British Columbia, Canada // Journal of Sedimentary Research. - 2005. - vol. 75(5). - pp. 844-860.
105. Lejzerowicz, A., Kowalczyk, S., Wysocka, A. Application of ground penetrating radar method combined with sedimentological analyses in studies of glaciogenic sediments in central Poland // Studia Quaternaria, 2018. – Vol. 35. – no. 2. – P. 103 – 119.
106. 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 // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2016. – № 8 (Спец. вып. 21). – стр. 504 – 514.

107. Панишев, С. В. Методический подход к прогнозу производительности драглайна при разработке взорванной горной массы в карьерах криолитозоны / С. В. Панишев, М. В. Каймонов // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 98 – 104.
108. Калашник, А. И. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера в целях оптимизации параметров проведения буровзрывных работ / А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. №3 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/georadarnoe-issledovanie-geologo-strukturnogo-stroeniya-rabochego-ustupa-kariera-v-tselyah-optimizatsii-parametrov-provedeniya> (дата обращения: 22.09.2022).
109. Гирич, И. Б. Повышение эффективности взрывных работ на карьерах со сложной геологической структурой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №5. – С. 306-308.
110. 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.
111. Федорова, Л. Л. Дистанционный прогноз обводненности взрывных блоков при открытой разработке месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, С. В. Панишев, А. П. Винокуров // Современные технологии освоения минеральных ресурсов : сборник материалов 6-й Международной научно-технической конференции (г. Красноярск, 14-29 февраля 2008 г.). – Красноярск : ИПК Сиб. федер. ун-та, 2008. – Вып. 6. – С. 181 – 188.
112. Куляндин Г. А. Исследование вскрышных пород Кангаласского угольного месторождения методом георадиолокации Проблемы горной науки: взгляд молодых ученых»: I научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов ИГДС СО РАН, посвященная памяти

академика РАН Н.В. Черского, г. Якутск, 7 февраля 2012 г. – Якутск: Изво ФГБУН Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. – С. 42 – 50.

113. Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны : коллективная монография / А. С. Курилко, С. А. Ермаков, Ю. А. Хохолов, М. В. Каймонов, А. М. Бураков ; отв. редактор А. В. Омеляненко ; Институт горного дела Севера СО РАН. – Новосибирск : Академическое издание “Гео”, 2011. – 139 с.
114. Бураков, А. М. Анализ изменчивости основных параметров продуктивных толщ Куранахского золото-россыпного месторождения / А. М. Бураков, С. А. Ермаков, В. Л. Гаврилов, И. С. Касанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 61 – 67.
115. Куляндин, Г. А. Экспериментальные георадиолокационные исследования на дражных полигонах Якутии / Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова, Н.Д. Прудецкий // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России»: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-корр. РАН М. Д. Новопашина, г. Якутск, 16-19 июня, 2015 г., Якутск, 2015. – С. 148 – 150.
116. Fedorova .L. L., Kulyandin G. A. 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).
117. Куляндин, Г. А. Расчленение горизонтально-слоистых сред георадиолокацией при изменении углов зондирования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 10-12 апр.



2019 г. – 2019. – Т. 2. – С. 253 – 256.

118. Федорова, Л.Л., Саввин Д.В., Федоров М.П., Куляндин Г.А., Стручков С.А. Георадиолокационный мониторинг состояния грунтов дорожных конструкций, эксплуатируемых в условиях криолитозоны // Дороги и мосты. – 2017. – Вып. 38/2 – С. 189 – 206
119. Брякин, И. В. Системы подповерхностного зондирования для малоглубинной геофизики / И. В. Брякин // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1(28). – С. 83 – 93.
120. Фоменко, Н. Е. Исследование техногенно-закрепленных грунтов основания фундаментов радиолокационным и сейсмическими методами в условиях длительно эксплуатируемого объекта культурного наследия / Н. Е. Фоменко, В. В. Капустин, Д. А. Гапонов, Л. Н. Фоменко // Известия Томского политехнического университета. – 2018. – Т. 329 (8). – С. 16 – 29.
121. Кулик, К. Н. Возможности георадарного обследования состояния несанкционированного полигона бытовых отходов / К. Н. Кулик, С. Я. Семенов, С. С. Марченко, Д. П. Арьков, А. В. Кошелев, Н. В. Морозова // Экология и строительство. – 2019. – № 4. – С. 4 – 13.
122. Куляндин, Г. А. Выявление техногенного загрязнения грунтовой среды методом георадиолокации (на примере участка строительной площадки) / Г. А. Куляндин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции (г. Якутск, 18-20 апреля 2018 г.). – Якутск, 2018. – Т. 2. – С. 224 – 227.
123. 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).

124. Набатов, В. В. Георадиолокационное выявление параметров армирования строительных конструкций и тоннелей метрополитенов. спектр задач и помеховых факторов / В. В. Набатов, Р. М. Гайсин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12. – С. 168 – 175.
125. Stadler S., Igel J.. A numerical study on using guided GPR waves along metallic cylinders in boreholes for permittivity sounding // 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018, – P.543 – 548.
126. Klewe, T., Strangfeld, C., Kruschwitz, S. Review of moisture measurements in civil engineering with ground penetrating radar – Applied methods and signal features // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 278. – P. 9.
127. Igel, J., Anschutz, H., Schmalholz, J., Wilhelm, H., Breh, W., Hötzl, H., Hübner, C. Methods for Determining Soil Moisture with Ground Penetrating Radar (GPR) // Field Screening Europe. – 2001. – P. 303 – 308.
128. Бричёва, С. С. Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников / С. С. Бричёва, В. М. Матасов, П. М. Шилов // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2017. – № 3. – С.76 – 83.
129. Бричева, С. С. Изучение «скрытых» повторно-жильных льдов в Чарской котловине (Забайкальский край, Россия) / С. С. Бричева, Ю. В. Станиловская // EAGE Conference & Exhibition, Инженерная геофизика. – 2017. – С. 4.
130. Sahoo, H., Gandre, D., Das, P., Karim, M., Bhuyan, G. Geochemical mapping of heavy metals around Sukinda–Bhuban area in Jajpur and Dhenkanal districts of Odisha, India. Environmental Earth Sciences, 2018. – № 34. – P. 17.
131. Дягилева, Р.А. Возможности георадиолокации и электротомографии по выявлению геокриологических структур в массиве горных пород

криолитозоны (на примере Кангаласского угольного разреза) / Р.А. Дягилева, К.О. Соколов, Г.А. Куляндин, А.А. Федоров // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 2020 г. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020 – С. 564-566.

132. Куляндин, Г. А. Георадиолокационное профилирование с пространственной переориентацией антенного блока по методике углового сканирования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 5 – 7 апреля 2017 г. – 2017. – С. 448 – 451.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 141971

**АНТЕННЫЙ БЛОК ГЕОРАДАРА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт горного дела Севера имени Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014102836

Приоритет полезной модели **28 января 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **15 мая 2014 г.**

Срок действия патента истекает **28 января 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2561769

СПОСОБ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В УСЛОВИЯХ  
ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014117846

Приоритет изобретения 29 апреля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 05 августа 2015 г.

Срок действия патента истекает 29 апреля 2034 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



**АКТ**

*о реализации научных результатов исследования, полученных  
 представителем ИГДС СО РАН Куляндиным Г.А.*

Комиссия в составе: председатель – и.о. генерального директора ООО а/с «Дражник» Степанов М.В., члены комиссии: главный геолог Ткалич Г.В., зам. главного геолога Сосков А.Ю. установила, что при проведении георадиолокационных исследований на участках дражной отработки в период с 2013 по 2016 г.г. на основании взаимовыгодного сотрудничества (обращение ИГДС СО РАН к ООО а/с «Дражник» от 27.03.2013 №15636-22-2115/119) реализована разработанная Куляндиным Г.А. (Пат. 141971 Российская Федерация, G01S 13/88. Антенный блок георадара / Г.А. Куляндин, П.А. Омеляненко ; Ин-т горн. дела Севера СО РАН; заявл. 28.01.2014; опубл. 20.06.2014 // Бюл. –2014. – № 17.– 1с., Пат. 2561769 Российская Федерация, G01V 3/12. Способ георадиолокации в условиях ограниченного пространства / Г.А. Куляндин, П.А. Омеляненко ; Ин-т горн. дела Севера СО РАН; заявл. 29.04.2014; опубл. 10.09.2015 // Бюл. –2015. – № 25.– 5с.) «Методика углового георадиолокационного сканирования горных пород из одной точки наблюдений», отличающаяся возможностью получать данные георадиолокационного зондирования из одного местоположения на участках сложно-пересеченной местности, посредством изменения угловых положений антенного блока, помещенного в углубление или размещенного на насыпи полуцилиндрической формы, относительно нормали к зондируемой поверхности в секторе 70 градусов. Использование разработанной методики на участке ведения вскрышных работ месторождения р. Аллах-Юнь, в составе георадиолокационных исследований методом профилирования, позволило выявить, на фоне множества дифрагированных на валунах и гальке волн, кровлю коренных пород, верхнюю и нижнюю границу обводнения в толще рыхлых отложений мерзлого массива, тем самым повысило информативность и детализацию георадиолокационного разреза.

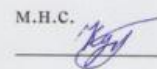
Представители ООО а/с «Дражник»

Представитель ИГДС СО РАН

Главный геолог

м.п.с.

 Ткалич Г.В.

 Г.А. Куляндин

Зам. главного геолога

 Сосков А.Ю.



## АКТ

*о реализации научных результатов исследования*

Мы нижеподписавшиеся, представители ООО а/с «Дражник»: главный геолог Ткалич Г.В., зам. главного геолога Сосков А.Ю. и представители Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук: заведующая лабораторией георадиолокации Федорова Лариса Лукинична, научный сотрудник Саввин Денис Валерьевич и младший научный сотрудник Куляндин Гаврил Александрович составили настоящий Акт о том, что в период с 2013 по 2016 г.г. на основании взаимовыгодного сотрудничества (обращение ИГДС СО РАН к ООО а/с «Дражник» от 27.03.2013 №15636-22-2115/119) разработана и апробирована методика георадиолокационного картирования дражного полигона на месторождении р. Аллах-Юнь.

По результатам георадиолокационного исследования решены задачи по выявлению кровли коренных пород, участков обводнения рыхлой толщи песков и локализации нарушенной структуры коренных пород, а также по картированию гипсометрии плотика.

Проведенные теоретические и экспериментальные георадиолокационные исследования на участке дражной отработки (Драга №146) месторождения золота р. Аллах-Юнь в Республике Саха (Якутия) позволили сделать вывод о возможности эффективного применения методики георадиолокационного картирования дражных полигонов при разработке россыпных месторождений криолитозоны аналогичного типа, обеспечивая возможность трехмерного отображения геологического строения россыпи с выделением ее структурных особенностей (мощность песков, гипсометрия и нарушенность плотика) и, безусловно, заслуживает дальнейшего внедрения в практику, что имеет большое значение для оперативного контроля полноты и качества выемки золотоносных песков, принятия соответствующих технологических решений.

Представители ООО «Дражник»

Главный геолог

Ткалич Г.В.

Зам. главного геолога

Сосков А.Ю.

Представители ИГДС СО РАН

Заведующая лабораторией  
георадиолокации, к.т.н.

Л.Л. Федорова

н.с., к.т.н.

Д.В. Саввин

м.н.с.

Г.А. Куляндин