

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



**Федорова Лариса Лукинична**

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

Специальность 2.8.3

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

диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Якутск – 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Глава 1. Современное состояние методов оценки свойств, строения и состояния массива горных пород на месторождениях криолитозоны	16
1.1 Горно-геологические и геокриологические условия открытой разработки месторождений криолитозоны	16
1.2 Анализ современных способов получения горно-геологической информации	24
1.3 Основные результаты георадиолокационных исследований	28
Выводы к главе 1	39
Глава 2. Разработка георадиолокационных моделей массива горных пород криолитозоны	40
2.1 Моделирование процесса распространения высокочастотных электромагнитных волн в условиях неоднородных сред	40
2.1.1 Электрофизические свойства горных пород россыпных месторождений криолитозоны	41
2.1.2 Электродинамическое моделирование георадиолокационных зондирований	48
2.1.3 Двухмерная электродинамическая модель неоднородной среды с потерями	58
2.2 Георадиолокационные модели массивов горных пород россыпных месторождений криолитозоны	67
2.2.1 Георадиолокационные модели мерзлых рыхлых отложений Субарктической зоны Якутии	67
2.2.2 Георадиолокационные модели массива мерзлых горных пород россыпных месторождений Умеренной климатической зоны	79
Выводы к главе 2	89

Глава 3. Алгоритмы, программно-информационное обеспечение обработки и интерпретации данных георадиолокации массивов горных пород	90
3.1 Обработка данных при оценке строения массива мерзлых горных пород	90
3.1.1 Алгоритм обработки данных георадиолокации слоистых сред	90
3.1.2 Разработка признаков выявления пластового льда по данным георадиолокационных измерений	98
3.1.3 Особенности обработки данных георадиолокационного картирования неоднородного массива мерзлых горных пород	106
3.2 Методика интерпретации свойств и состояния горных пород по данным георадиолокационных исследований	114
3.2.1 Интерпретационные признаки и алгоритм обработки данных исследования геокриологических параметров массива горных пород	115
3.2.2 Программно-информационное обеспечение картирования строения и состояния массива горных пород	122
Выводы к главе 3	131
Глава 4. Методика оценки влажности дисперсных горных пород и грунтов методом георадиолокации	132
4.1 Экспериментальное исследование скорости распространения георадиолокационных сигналов в мерзлых горных породах в процессе их оттайки	132
4.2 Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород	140
4.3 Программное обеспечение мониторинговых исследований изменения влажности горных пород	146
Выводы к главе 4	151

Глава 5. Технология георадиолокационных зондирований при изучении горно-геологических условий разрабатываемого массива	152
5.1 Методика георадиолокационных измерений при исследовании строения массива мерзлых горных пород россыпных месторождений.	152
5.1.1 Георадиолокационная аппаратура. Параметры измерений	153
5.1.2 Полевые работы	158
5.1.3 Прослеживание границы продуктивных горизонтов	164
5.2 Методика георадиолокационного картирования дражных полигонов	167
5.2.1 Дистанционные исследования методом георадиолокации	167
5.2.2 Уточнение местоположения структурных особенностей строения массива горных пород	171
5.3 Картирование пространственного распределения геокриологических объектов в массиве горных пород	176
Выводы к главе 5	180
Глава 6. Георадиолокация при инженерно-геологических изысканиях на участках ведения горных работ	181
6.1 Георадиолокационные параметрические зондирования	181
6.2 Скважинная георадиолокация	187
6.3 Технология выявления участков развития опасных криогенных процессов	195
6.3.1 Исследование характеристик георадиолокационных сигналов при зондировании массивов горных пород различного криогенного состояния	195
6.3.2 Физическое моделирование георадиолокации процесса оттаивания массива мерзлых горных пород	197

6.3.3	Методика георадиолокационных наблюдений в режиме мониторинга	202
	Выводы к главе 6	219
	Заключение	221
	Список использованных источников	224

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

В условиях усиливающейся конкуренции за инвестиции в горнодобывающие проекты особое значение приобретают технологии, обеспечивающие высокую точность, экономическую и экологическую эффективность разведочных работ. Среди них георадиолокация (ГРЛ) выделяется как один из наиболее перспективных методов благодаря высокому разрешению, неразрушающему способу измерений, компактности аппаратуры и экологической безопасности. Однако применение ГРЛ при изучении россыпей Якутии осложняется рядом научно-практических проблем. Электрофизические свойства мерзлых и талых отложений резко различаются и изменяются сезонно, что усложняет интерпретацию радарограмм. Неоднородность

россыпных толщ формирует сложную картину отражений, требующую адаптированных алгоритмов обработки данных. Кроме того, отсутствует научно-обоснованная методика применения ГРЛ для оценки параметров россыпей в условиях криолитозоны, что ограничивает её практическое внедрение.

Таким образом, наблюдается разрыв между потребностями горнопромышленных предприятий и уровнем научно-методического обеспечения георадиолокационных исследований в условиях многолетней мерзлоты. Разработка научно-методических основ георадиолокационной технологии, учитывающей геолого-структурные особенности, физические свойства мерзлых пород и требования цифровизации разведочного процесса, является актуальной научной проблемой и соответствует приоритетам государственной программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны РФ», а также задачам научно-технологической инициативы по ускоренному развитию минерально-сырьевой базы страны.

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

В СССР исследования по развитию георадиолокации велись в Научно-исследовательском институте горной геомеханики и маркшейдерского дела, Институте геологических наук АН и Геофизическом институте СО АН. В 1960-1970-х гг. В.В. Богородский, Г.В. Трепов, Б.Я. Козлов доказали повышенную радиопрозрачность мерзлых грунтов и впервые выделили сигналы от льдистых и талых разностей. Существенный вклад в развитие метода внес коллектив Школы георадиолокации МГУ под руководством М.Л. Владова и А.В. Старовойтова, выполнивший многочисленные исследования на суше и акваториях.

П.Н. Александров (ИФЗ РАН) развил теоретические основы метода, предложив решения обратных задач и способы интерпретации данных. Методические подходы для мониторинга горнотехнических объектов Арктики разработали А.И. Калашник и А.Ю. Дьяков (Кольский ФИЦ РАН). В ИНГГ СО РАН (А.А. Черемисин, М.И. Эпов, В.В. Оленченко и др.) создана сверхширокополосная система для георадиолокации низкоомных геологических сред. В ПФИЦ УрО РАН Ю. И. Степанов применил георадиолокацию для изучения мощности многолетнего льда и подземных наледей. В НИТУ МИСиС В.В. Набатов разработал технологию обнаружения пустот и дефектов за обделкой тоннелей. Исследования в криолитозоне под руководством А.В. Омеляненко (Л.Г. Нерадовский, Л.Л. Федорова, К.О. Соколов, И.И. Христофоров, Д.В. Саввин и др.) подтвердили эффективность георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях. Ими предложены эмпирические зависимости диэлектрической проницаемости мерзлого суглинка от льдистости, разработаны различные методики параметрических измерений, проведения съемок с водной поверхности и борта воздушного судна.

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

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

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

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

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

**Задачи исследований:**

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

### **Основные защищаемые положения:**

1. Георадиолокационные модели верхней части геологического разреза россыпных месторождений Якутии, построенные на основе анализа результатов численного, физического моделирования и многочисленных натуральных измерений, с учетом электрофизических свойств мерзлых горных пород и региональных климатических условий, достоверно отражают особенности строения и состояния массивов горных пород россыпных месторождений криолитозоны.
2. Разработанные алгоритмы, программно-методическое обеспечение обработки данных, интерпретационные признаки и критерии, учитывающие установленные закономерности изменения характеристик георадиолокационных сигналов и особенности формирования радарограмм при зондировании массивов мерзлых горных пород, обеспечивают корректную оценку горно-геологических условий россыпных месторождений криолитозоны.
3. Методика георадиолокационного мониторинга, основанная на применении установленной эмпирической связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности горных пород ( $7\% < W < 25\%$ ), учитывающей криогенное состояние и вещественный состав исследуемых дисперсных горных пород, позволяет оценить их влажность по данным разносезонных георадиолокационных измерений.
4. Технология наземных и дистанционных георадиолокационных измерений для решения задач исследования горно-геологических условий массивов многолетнемерзлых горных пород позволяет:
  - прослеживать границы продуктивных горизонтов россыпных месторождений криолитозоны;
  - определять местоположение структурных особенностей строения массива горных пород;
  - картировать пространственное распределение геокриологических объектов разрабатываемого массива горных пород.

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

#### **Научная новизна выполненных исследований:**

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

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

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

4. В результате численного, физического моделирования и экспериментальных георадиолокационных исследований выявлены основные закономерности изменения параметров георадиолокационных сигналов и особенности радарограмм, позволяющие оценить горно-геологические условия россыпных месторождений криолитозоны: геологическое строение, состав и

свойства слагающих пород, наличие геокриологических объектов, развитие криогенных процессов.

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

### **Теоретическая и практическая значимость**

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

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методология и базирующиеся на ней методики георадиолокационных исследований позволяют прослеживать границы продуктивных горизонтов, определять местоположение зон нарушенностей строения массивов горных пород, картировать пространственное распределение геокриологических параметров разрабатываемого массива горных пород, что имеет важное значение при выборе наиболее рациональных технологических решений открытой разработки россыпных месторождений и обеспечения безопасности проведения горных работ. Результаты настоящего исследования являются важнейшей предпосылкой для трансформации георадиолокации из вспомогательного в базовый метод эксплуатационной разведки россыпных месторождений в Якутии.

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

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

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

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

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований представлены на международных научных конференциях: «Современные технологии освоения минеральных ресурсов» (Красноярск, 2008), «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2010, 2013), International Conference on Ground Penetrating Radar (Shanghai, 2012; Brussels, 2014; Hong Kong, 2016; Rapperswil SG, 2018), Международных симпозиумах по проблемам инженерного мерзлотоведения (Мирный, 2011; Магадан, 2017), «Problems of Complex Development of Georesources» (Хабаровск, 2009, 2020, 2022; Харбин, 2025), Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics» (Perm, 2020; Gelendzhik, 2021), «Earth and Environmental Science» (Vladivostok, 2020),

«Неделя горняка» (Москва, 2011-2025), «Георадар» (Москва, 2017 - 2023), а также на всероссийских и региональных научно-практических конференциях: «Безопасность горного производства в Республике Саха (Якутия)» (Якутск, 2008, 2023), «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России» (Якутск, 2014, 2016, 2018, 2022), «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (Якутск, 2011-2025) и на Объединенном ученом совете ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Якутск, 2025).

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

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

строения ледяного покрова на затороопасных участках Северных рек методом георадиолокации» (2022-2023 гг.).

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

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 259 наименований. Общий объем работы - 258 стр., 15 табл., 117 рис.

### **Благодарности**

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

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ, СТРОЕНИЯ И СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

## 1.1 Горно-геологические и геокриологические условия открытой разработки месторождений криолитозоны

Горно-геологические условия россыпных месторождений определяются совокупностью природных факторов, влияющих на формирование и размещение скоплений ценных минералов в рыхлых отложениях [185]. «Эти условия для россыпей в криолитозоне включают особенности геологического строения района, состав и свойства слагающих пород, а также геокриологические условия. В строении наиболее распространенных типов россыпей различают следующие основные части: а) торфа, б) пески или пласт и в) плотик [70].

При разработке месторождений, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород, необходимы достоверные знания о геокриологических условиях, которые существенно влияют на эффективность и рациональность освоения месторождений» [39]. С геокриологическими условиями в значительной мере связаны прочностные, тепло- и электрофизические, фильтрационные и другие свойства массивов пород в области распространения многолетней мерзлоты. Опыт освоения месторождений криолитозоны показывает необходимость не только детального изучения геокриологической обстановки при разведке месторождений, но и мониторинга неизбежных и возможных нарушений геокриологической обстановки, вызываемых естественными и техногенными изменениями всего комплекса природных условий в связи с проводимыми горными работами. Недостаточное изучение геокриологических условий может привести к незапланированным деформациям пород с последующим их обрушением или сдвижением (рисунок 1.1). Подобные геомеханические процессы происходят вследствие протаивания мёрзлых пород, содержащих значительное количество льда, что приводит к ухудшению теплового режима, увеличению водопритока и обводнению горных пород. Обводненность и повышенная влажность породы

способствуют налипанию, примерзанию пород к рабочим органам выемочно-погрузочного оборудования и сосудам транспортных средств, простоям и удорожанию себестоимости разработки месторождений.



а) провал горной техники  
в результате размыва грунтов



б) выход негабарита в результате  
«прострела» скважинного заряда в талую  
зону

Рисунок 1.1 – Примеры негативного влияния оттайки мерзлых пород [16]

Основными геокриологическими параметрами месторождений являются:

- распространение многолетней мерзлоты и её прерывистость;
- температура пород в подошве слоя годовых теплооборотов;
- влажность (льдистость) горных пород;
- условия залегания подземных льдов;
- мощность сезонно-талого слоя (СТС);
- надмерзлотные воды;
- талики.

В некоторых случаях представляют интерес следующие геокриологические явления: бугры пучения, полигональность поверхности, термокарстовые западения, склоновые процессы, наледи и пр.

Учитывая, что россыпные месторождения Якутии расположены в различных климатических зонах, которые имеют разные геокриологические условия, влияющие на результаты георадиолокации, обобщение геологического строения и анализ геофизических свойств массива горных пород проведены в пределах Субарктической и Умеренной климатических зон Якутии [29, 42-46]. В субарктической зоне находятся основные месторождения россыпных алмазов, относящиеся к Анабарской, Далдыно-Алакитской и Приленской алмазоносным

областям, а также Зырянский угольный разрез. В умеренной зоне расположены россыпи золота (месторождение «Аллах-Юнь», россыпь р. Нера и др.), Ботуобинская и Марха-Тюнгская алмазоносные области, угольные разрезы («Кангаласский», «Харбалахский», «Джебарика-Хая»).

Анализ горно-геологических условий месторождений *субарктической зоны* проведен на примере месторождений, разрабатываемых АО «Алмазы Анабара». Типичным примером таких месторождений является россыпь р. Маят, расположенная в южной части Анабарского района Республики Саха (Якутия) в 300 км от побережья Северного Ледовитого океана в бассейне одноименной реки – правого притока реки Анабар. Район расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которой превышает 350 м. Мощность деятельного слоя составляет 0,3-1,2 м. На склонах южной экспозиции грунт оттаивает на глубину 0,5-1,2 м, северной – до 0,3 м. Россыпь р. Маят относится к аллювиальному типу. По геолого-геоморфологическому строению россыпь разделена на четыре участка: Приустьевой, Нижний, Средний и Верхний. Продуктивный пласт верхнечетвертичной россыпи р. Маят приурочен к днищу долины ручья, повсеместно перекрыт торфами мощностью до 8 м и представлен аллювиальными глинистыми песками с переменным (20-50%) содержанием гравия, гальки, щебня и мелких валунов-плит преимущественно местных карбонатных пород. «В пределах участка разработки на уровне современного эрозионного среза развиты карбонатные породы среднего-верхнего кембрия, терригенные отложения перми и юры, вулканогенно-осадочные образования триаса, а также нижнемеловые и плиоценовые отложения, залегающие в карстовых и эрозионно-карстовых палеодепрессиях. Четвертичные образования в районе развиты повсеместно. Представлены они широким набором генетических типов отложений: аллювиальными, озёрно-аллювиальными, озерно-болотными, полигенными и т.д. Породы осадочного чехла прорваны интрузивными комплексами раннемезозойского возраста (правобоярский, эбехаинский и куонамский комплексы). В геоморфологическом отношении бассейн р. Маят представляет собой выработанную в доломитах анабарской свиты денудационно-

аккумулятивную поверхность выравнивания неоген-верхнечетвертичного возраста, в которую врезаны унаследованные с верхнечетвертичного времени долины современных водотоков. В районе выделяется несколько типов рельефа: структурно-денудационный, денудационно-аккумулятивный, денудационно-эрозионный и эрозионно-аккумулятивный» [100]. Долинные верхнечетвертичные и современные россыпи бассейна р. Маят относятся к аллювиальным долинным мелкозалегающим россыпям с нормальной мощностью аллювия. Россыпи разные по размерам (от 3 до 30 км), запасам (мелкие и средние) и уровню содержаний алмазов. Мощность пласта является наиболее выдержанным параметром россыпей, ширина промышленного пласта и, в особенности, содержание алмазов могут характеризоваться высокой изменчивостью. По сложности геологического строения большая часть месторождения относится к третьей группе по классификации ГКЗ [73].

Продуктивный пласт верхнечетвертичных россыпей круглый год находится в мерзлом состоянии. Весовая льдистость «песков» составляет 25-45%, «торфов» – 30-60%. Пески верхнечетвертичных россыпей в бассейне р. Маят характеризуются как среднепромывистые. Основные горнотехнические параметры участка «Лог 405» россыпи «Маят-Водораздельный», где проводились георадиолокационные исследования, представлены в таблице 1.1.

«Ручей «Лог 405» расположен в юго-восточной части изученной площади и является правым притоком руч. Курунг-Юрях, впадающего в р. Маят. Аллювиальная верхнечетвертичная россыпь долинного типа. По сложности геологического строения месторождение отнесено к 3 группе по классификации ГКЗ [58]. Россыпь относится к мелким (протяженность 3,5 км, площадь менее 0,2 км<sup>2</sup>), характеризуется значительным разбросом содержаний алмазов (0,01-2,03 кар/м<sup>3</sup>), промконтур отличается небольшой шириной. Промышленный пласт россыпи приурочен к русловой фации верхнечетвертичных аллювиальных образований, выполняющих сравнительно ровное ложе долины. Основной контур россыпи в плане имеет лентовидную форму (при протяженности 3,5 км ширина пласта в пределах промконтура колеблется от 31,4 м до 78,4 м, в среднем составляя

53,0 м). В пределах промконтура россыпь характеризуется сравнительно выдержанными мощностями торфов и песков (коэффициент вариации (V) 0,28 и 0,29 соответственно) и изменчивостью средних содержаний алмазов (V = 0,87)» [100].

Таблица 1.1 Основные горнотехнические параметры россыпей участка «Маят-Водораздельный»

Параметры	Мощность песков, м	Мощность торфов, м	Площадь блока, тыс. м <sup>2</sup>	Коэффициент вскрыши
1	2	3	4	5
<b>1. Верхнечетвертичная россыпь</b>				
Значения по выработкам	min	0,80	1,00	
	max	2,70	3,60	
Значения по блокам	min	1,27	1,62	2,80
	max	2,10	3,10	47,76
Среднее по россыпи		1,51	2,55	20,98
Коэффициент вариации		0,29	0,28	
<b>2. Плиоценовая россыпь</b>				
Значения по выработкам	min	1,70	2,60	
	max	7,20	3,20	
Значения по россыпи		4,52	2,89	7,01
				0,64

«Усредненный геолого-литологический разрез россыпи приведен в таблице 1.2. Торфа россыпи представлены льдистыми (до 50%) илами и суглинками мощностью 1,0-3,6 м, имеющими следующие характеристики: влажность 0,31 – 0,52, объемная льдистость 40,5-91,2% (средняя 89%), объемный вес 1,28 г/см<sup>3</sup>, коэффициент разрыхления 1,18-1,56 (средний 1,35). Продуктивный пласт россыпи представлен льдистыми илистыми песками с относительно невысоким содержанием щебня, гальки, гравия и некрупных валунов-плит. Обломки представлены преимущественно (70-80%) слабоокатанными «местными» породами – доломитами, окремнелыми доломитами. Содержание хорошо окатанной гальки, гравия «экзотических» пород (кремней, кварца, халцедона) составляет 10-20%.

Плотиком россыпи служат массивные трещиноватые доломиты. Рельеф плотика пологий, слабоволнистый, тальвег выражен слабо. Мощность верхнего слоя дезинтегрированных доломитов и щебнисто-глыбового элювия не превышает 10-20 см» [100].

Таблица 1.2 Геолого-литологический разрез россыпи ручья «Лог 405» (в пределах промышленного контура)

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

Физико-механические характеристики торфов и песков приняты аналогичными характеристикам россыпи ручья Курунг-Юрях, притоком которого является руч. «Лог 405», и приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Физико-механическая характеристика торфов и песков аллювиальной россыпи ручья Курунг-Юрях

Тип отложений	Параметры, <u>от - до / среднее</u>		
	Коэффициент разрыхления	Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	Льдистость весовая, %
Породы вскрыши (торфа)	<u>1,19-1,66</u> 1,37	<u>1,18-1,48</u> 1,30	<u>18,18-85,25</u> 35,15
Продуктивный горизонт (пески)	<u>1,16-1,81</u> 1,43	<u>1,53-2,43</u> 1,94	<u>18,97-62,42</u> 39,97

В качестве примера горно-геологических условий месторождений *умеренной зоны* приводится описание участка россыпи р. Аллах-Юнь.

Россыпь р. Аллах-Юнь расположена в пойме одноименной реки, являющейся правым притоком р. Алдан. Основные черты рельефа района среднего течения р. Аллах-Юнь, характеризуются сильной расчлененностью складчатого нагорья [54, 91]. Месторождение р. Аллах-Юнь относится по генезису к аллювиальному, а по морфологическим признакам к долинному типу россыпей. Оно характеризуется неглубоким залеганием полезного ископаемого, сравнительно ровным и пологим плотиком, большой протяженностью и шириной, наличием участков, пораженных многолетней мерзлотой (48 %) и водными таликами. Россыпь р. Аллах-Юнь,

залегаящая в современных отложениях, является пойменно-террасовой (долинной), протяженностью около 36 км. В долине хорошо выражена 1-я надпойменная терраса, выше которой как справа, так и слева прослеживается флювиогляциальная терраса 40-метрового уровня. Рыхлые отложения долины р. Аллах-Юнь имеют двучленный разрез аллювия. По данным отчета [91] разрез рыхлых отложений современного звена двухслойный:

- 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 2-3 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.

Многолетняя мерзлота распространена повсеместно, исключая отдельные участки таликов, приуроченных к русловой части долины. Глубина сезонного оттаивания непостоянна и зависит от экспозиции склонов, наличия мохового и растительного покровов. 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 3-3,5 м.

По результатам анализа горно-геологических и геокриологических условий наиболее крупных месторождений криолитозоны разрабатываемых открытым способом, расположенных в субарктической и умеренной климатических зонах установлено, что глубина, на которую необходимо изучать геологический разрез массива горных пород составляет 30 м. Аллювиальные отложения представлены в основном галечно-гравийно-песчаным материалом с примесью ила и глины. Коренные породы представлены карбонатными породами, в верхней части до 1-2 м, в большинстве случаев трещиноватые и разрушенные. Рельеф плотика россыпей неровный, со значительными выступами и западинами.

Отличительной геокриологической характеристикой изученных месторождений является повсеместное развитие толщи многолетнемерзлых пород и участков островной мерзлоты. В субарктической зоне сезонно-талый слой изменяется незначительно (от 0,3 до 1,6 м), надмерзлотные воды, приуроченные к нижним частям склонов долин водотоков, имеют мощность потока от 0,1 до 0,3 м при глубине залегания от 0,15 до 1,0 м. Незначительные талики (0,5-1,0 м) сохраняются в галечных и грубообломочных отложениях элювиального происхождения и верхних горизонтах коренных доломитах. В Анабарской алмазоносной области встречаются лёд-цемент, жильный лёд, инфильтрационный и сублимационный, а также пластовый инъекционно-сегрегационный лёд. В аллювии террас широко распространены полигонально-жильные льды, приуроченные, главным образом, к пойменной фации. Мощность ледяных жил варьируется от 1-6 м. Жильные льды в основном залегают в трещиноватых горных породах в верхней 10-25 метровой части разреза, максимальная ширина которых, составляет 0,1-0,15 м. Локализация подобных жильных льдов возможна методами геофизики [41, 98].

«В умеренной зоне мощность сезонно-талого слоя (СТС) в горной части территории на склонах северной экспозиции в верховьях р. Нера составляет 0,2-0,3 м, а на обнаженных склонах в центральной части достигает до 2-4 м. Надмерзлотные воды приурочены к сезонно-талым отложениям, глубина залегания которых составляет от 0,2 до 1,0 м. Талики распространены локально, их существование связано исключительно с отепляющим влиянием подземных вод, а также за счет солнечной радиации и встречаются они в основном в долинах рек. На территории прослеживаются повторно-жильные льды, средняя ширина которых по верху составляет 1,5-3 м, ледяные жилы шириной до 2 м и высотой 3-4 м» [39].

«По анализу глубины залегания, около 60 % россыпных месторождений залегают на глубине не более 10 м, но значительная часть - на глубине от 10 м и более» [39]. Из числа наиболее глубокозалегающих месторождений можно отметить: «Алёнка» (до 28 м); «Амурский» (до 26 м) «Антагачан-устье» (до 38 м),

группа месторождений реки Большой Тарын (от 10-40 до 60 м), россыпь реки Большой Куранах (до 65 м), «Базовский» (до 33 м), «Бам» (до 22 м) и другие [121].

## **1.2 Анализ современных способов получения горно-геологической информации**

Инженерные службы горнодобывающих компаний при планировании горных работ используют информацию из целого ряда источников. К основным материалам, которыми руководствуются технологи в процессе проектирования, относятся: геологические отчеты по результатам разведки разрабатываемого месторождения различных стадий (предварительной, детальной, эксплуатационной), информация об отработке соседних участков месторождения, прогнозные данные полевой геофизики и геофизических исследований скважин.

Разведка россыпных алмазных месторождений криолитозоны требует высокой точности и детальности из-за сложных горно-геологических условий (неоднородность толщ отложений, наличие валунов, карстовых пустот и др.) и наличия вечной мерзлоты [32, 74, 105]. Получение статистически представительных проб здесь является критическим требованием, определяющим методику опробования и параметры буровых работ. Увеличение плотности сети буровых выработок необходимо для уточнения модели месторождения и корректного подсчёта запасов, что обусловлено высокой изменчивостью алмазности даже на небольших участках [4].

Традиционно при разведке россыпей применяют ударно-канатное и алмазное бурение (вертикальное). В условиях мерзлоты и необходимости быстрого отбора проб широкое распространение получило роторное бурение с продувкой воздухом или газом. В последние годы считается, что бурение с продувкой воздухом – один из самых прогрессивных и эффективных способов для многолетнемерзлых пород. Сжатый воздух служит для немедленного выноса разрушенного шлама на поверхность, что обеспечивает мгновенную очистку забоя, высокую скорость проходки и улучшение качества отбора проб. Отсутствие гидростатического давления жидкости повышает механическую скорость бурения и практически

исключает повторное измельчение шлама. Как отмечают Джураев и Меркулов (2014), такой метод «позволяет в определённых условиях существенно повысить производительность и снизить стоимость буровых работ» [36].

*Шурфование* (выемка длинных траншей или штреков) целесообразно на небольших глубинах или в приустьевых зонах рек. Шурфы дают прямые данные по мощностям и стратиграфии аллювиальных покрытий, выявляют строение коренного основания, служат для проверки участков с повышенной валунностью или трещиноватостью грунта. Шурфы незаменимы при разведке береговых и речных террас, где возможно производство вскрышных работ и получение больших объёмов материала для анализа. Результаты шурфования используются для детализации карт залегания подошвы и для отбора крупнообъемных проб шлиха.

*Шлиховой анализ проб.* После отбора керновых или забуренных керновых проб производят шлиховое опробование – выделение концентрата тяжелых минералов. Опробование включает дробление и промывку образцов с получением искусственного шлиха, затем концентраты обогащают (отделяют пустую породу) с помощью тяжелых жидкостей или магнитной сепарации. Далее извлекаемые алмазы пересчитывают вручную или с помощью рентгеновских сортировщиков (на основе люминесценции) по каратности и количеству. Эти методы определяют реальное содержание алмазов в каждом пробном интервале и являются основой для подсчёта запасов категории С1. Регулярное и тщательное шлиховое опробование – обязательная часть эксплуатационной разведки, гарантирующая, что вычисленные ресурсы отвечают фактической минерализации.

*Геофизические исследования* играют ключевую роль в разведке россыпных месторождений, так как они позволяют качественно и относительно быстро картировать подповерхностные структуры на больших площадях и создавать трёхмерные модели залегания аллювия. Эффективность геофизических методов подчёркивается в специализированных работах: например, по данным Абрамова и Бровкина (2012) «показаны эффективные способы решения геологических задач геофизическими методами при разведке россыпных месторождений алмазов» [1].

На практике используются все основные виды наземных геофизических работ [20, 179]:

*Электроразведка* (методы сопротивления, ВЭЗ, электротомография). Методы с введением токов постоянного или низкочастотного поля позволяют определить глубину залегания коренных пород, мощность рыхлого чехла и обособить отрезки повышенной проводимости (например, глинистых горизонтов). На россыпях проведение электроразведки часто затрудняется высоким содержанием глин и влажностью, однако в мерзлых условиях (низкая температура пород) резко повышается сопротивление пород, что улучшает её информативность [8]. В частности, ВЭЗ эффективно применяется для картирования рельефа «плотика» и выделения аномально мощных аккумулятивных толщ. Электроразведочные профили (прямые и инверсные) позволяют выделить горизонтальные и наклонные слои аллювия, разделить разрез по электрическим горизонтам и уточнить границы алмазоносных слоёв.

*Сейсморазведка.* Малоуглубинная сейсморазведка (сейсмические профили и пучки) применяются для выделения структурных нарушений, стратиграфических горизонтов и разделения разреза рыхлых пород [71, 184]. Сейсмические волны хорошо проходят через породы разного состава, и по времени прихода волн строят разрез глубинной секвенции. Следует отметить, что сейсморазведка на россыпях может давать высокую точность при детальном изучении, но её проведение сравнительно дорого (требуется большое количество источников и приёмников). «Микросейсморазведка является весьма информативным методом» для изучения россыпей, но «требует больших трудовых и материальных затрат» по сравнению с другими методами [132]. Поэтому сейсмика чаще используется для уточняющих работ на ограниченных участках с уже известной перспективой (например, при выделении продуктивных линз по контуру) [21].

*Магниторазведка.* Этот метод основан на измерении аномалий магнитного поля, создаваемых горными породами. На россыпных месторождениях магниторазведка применяется в основном для картирования коренных структур и выделения участков повышенной магнитоопасности (например, связанных с

кимберлитовыми трубками или плотиком из магнетитсодержащих пород). По результатам геофизических исследований на россыпях, магниторазведку обычно используют для выделения впадин в коренных породах (потенциальных палеодолин), перекрытых маломощным глинистым чехлом. Этот метод эффективен там, где залежи выступают на поверхность или скрыты тонким слоем аллювия; в таких случаях изменения магнитной проницаемости указывают на структурные ловушки алмазов.

*Гравиразведка.* Измерения малых аномалий силы тяжести позволяют определять изменения мощности рыхлой толщи (по понижению плотности аллювия по сравнению с плотным коренным основанием) и локальные тектонические структуры. Высокоточная гравиметрия («гравиразведка») применяется на россыпях преимущественно на второй фазе работ: при наличии первичной «оболочки» из разведочных скважин цель – уточнить глубину ложа и выявить крупномасштабные структуры, которые могли бы контролировать распространение аллювия.

*Буровой геофизический каротаж* и инструментальные исследования скважин. После бурения скважин продолжают применять геофизические исследования непосредственно в скважинах (ГИС). Это включает гамма-спектрометрию, нейтрон-активированный каротаж, радиоактивный каротаж, акустические и потенциал-мембранные логгеры и пр. Они дают детальную стратиграфию разреза скважины и позволяют непрерывно регистрировать свойства пород (тип пород, влажность, радиоактивность). Так, гамма- и нейтрон-логгеры помогают выделить карбонатные и силикатные слои, акустический каротаж – разделить песчаники и глинистые слои. Современное оборудование позволяет вести каротаж практически параллельно бурению, что повышает оперативность съёмки без нарушения горного гидромускула. Применение каротажа на россыпях по-прежнему считается важным завершением разведочных работ, поскольку точные данные по литологии и мощностям слоёв из скважины служат эталоном для интерпретации всех остальных методов.

Один из наиболее перспективных методов малоглубинной геофизики на россыпях криолитозоны - *Георадиолокация* (ГРЛ, Ground Penetrating Radar). В георадиолокации используются высокочастотные (от десятков МГц до сотен МГц) электромагнитные волны, которые отражаются и дифрагируют на границах пород с разными диэлектрическими свойствами. ГРЛ относят к высокочастотным радиоволновым методам исследования скоростных и поглощающих характеристик пород. В основе метода – дифракция и отражения волн в неоднородной среде. Основные достоинства ГРЛ – высокое разрешение профиля и скорость съёмки, что позволяет быстро получить двумерные разрезы рельефа и стратиграфии аллювия. Глубина проникновения ГРЛ в основном определяется электрофизическими свойствами пород и частотой используемых антенн: в сухих песчаных отложениях она может достигать десятков метров [3, 193, 200, 201].

### **1.3 Основные результаты георадиолокационных исследований**

Несмотря на то, что первые эксперименты с радиолокационными методами датируются началом XX века, популярность и признание георадиолокация получила только во второй половине столетия. Её развитие шло скачками, обусловленными прорывами в области электроники, военными и космическими проектами, а также всё более широким внедрением в геофизику и горную промышленность.

Идея радиолокационного зондирования земной толщии возникла вскоре после изобретения радара. Уже в 1904 году немецкий изобретатель К. Гюльсмайер запатентовал метод радиопеленгации объектов, что стало одной из первых технических предпосылок для появления георадара (патент DE 165546) [181]. В 1910г. G. Leimbach и H. Lowy подали патент №237944 на радиолокатор с непрерывной волной для поиска скрытых под землёй предметов [235, 236]. В 1926 году Hülsenbeck получил патент DE 489434 [194] на импульсный радар, использующий короткие электромагнитные импульсы для точного измерения расстояния до объектов. Это позволяло определить расстояние до цели путем анализа времени между отправкой импульса и приемом отраженного сигнала. В

отличие от радаров с непрерывной волной, импульсные системы обеспечивают более высокое разрешение и точность, что делает их полезными для детального сканирования и обнаружения объектов на различных расстояниях. Разработка импульсных радаров стала важным шагом в развитии радиолокационных технологий, заложив основу для современных систем

Одной из самых ранних и значимых работ, показавших эффективность георадиолокации в геофизике, стала статья В. Штерна [186], в которой автор измерил толщину ледника в Австрии. Этот эксперимент стал фактическим доказательством того, что радиоволны могут проникать в геологические среды и отражаться от их границ.

В 1940 году профессор А.А. Петровский провёл первые опыты по просвечиванию вечной мерзлоты электромагнитными волнами, что стало важным шагом в применении радиоволн для исследования мерзлых грунтов [93]. Впоследствии, в 1947 году, он совместно с Б.Н. Достоваловым разработал волномерный метод для изучения верхнего слоя почвы, что расширило возможности геофизических исследований [92]. Несмотря на перспективность, дальнейшее развитие шло довольно медленно: в 1940-1960-х гг. появилось лишь несколько подобных исследований, и метод оставался малоизвестным.

Существенный толчок в 1960-е годы георадиолокация получила благодаря гляциологам, изучавшим полярные льды. В США и Великобритании стали применять импульсные радиолокаторы для измерения толщины антарктических и арктических ледников. В 1969 году вышла статья Robin G. и др. [244], где были обобщены результаты зондирования гренландского ледникового щита. Учёные подтвердили, что радиоволны проникают через многокилометровые толщи льда и отражаются от подстилающей породы. Это убедительно доказало перспективы метода и заложило научную основу для его адаптации к другим средам.

Примерно в то же время в СССР стартовали исследования по георадиолокации. С 1967 года в Риге группа под руководством М. И. Финкельштейна начала адаптировать радиолокаторы для зондирования многолетнемерзлых грунтов и горных пород [208, 209]. К началу 1970-х были

созданы экспериментальные установки для непрерывного просвечивания грунта наносекундными импульсами, которые применялись в инженерной геологии, археологии и для поиска карстовых пустот [209]. Таким образом, к концу 1960-х годов метод георадиолокации из узкой гляциологической техники начал превращаться в многообещающий геофизический инструмент.

В 1970-х масштабные исследования георадара были во многом стимулированы военными и космическими проектами. Одним из ключевых событий стал эксперимент ALSE на космическом корабле «Аполлон-17» в 1972 году. Специально разработанный трёхчастотный радар с синтезированной апертурой, установленный на лунном орбитальном модуле, успешно просканировал приповерхностные слои Луны [255]. Согласно отчёту NASA, радар работал на частотах ~5, 15 и 150 МГц, достиг глубины ~1,3 км, а данные сохранялись на фотоплёнку из-за недостатка цифровой памяти [196]. Успех лунного эксперимента наглядно продемонстрировал потенциал георадара и вызвал всплеск интереса – метод перестал восприниматься как научная экзотика.

Вскоре усовершенствовалась и наземная аппаратура. В 1972 г. в США появилась компания Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI), которая выпустила первые коммерческие георадары. Morey R.M. представил опытный образец передвижного радара Subsurface Interface Radar (SIR). Вслед за этим были опубликованы результаты непрерывного профилирования грунта наносекундными импульсами на глубину нескольких метров [239].

В Канаде Annan, A. P. и Davis J. L. успешно протестировали импульсный радар для исследований вечномерзлых пород [194]. Эти исследования доказали, что георадар может выявлять границы слоёв горных пород, отличающихся по влажности и электропроводности, с высоким разрешением (порядка наносекунд). Горная отрасль быстро заинтересовалась новой технологией. Одним из первых направлений стало применение георадара для разведки месторождений соли. Немецкий исследователь Thierbach R. [250] показал, что импульсный радар регистрирует отражения от структур внутри соляных пластов. Вслед за этим

Unterberger R.R. опубликовал работу [252] в *Geophysics*, изучая прохождение радиоволн сквозь соль и обнаружение рассолонасыщенных зон.

Разработки методик георадиолокации для применения в горном деле активно начались в 1970-е, когда приборы стали коммерчески доступными [240]. В числе первых пионеров – исследования соляных месторождений [252] и угольных пластов [198]. К началу 1980-х интерес к ГРЛ в горной промышленности усилился благодаря успехам электроники, в частности появлению переносных радаров GSSI. В Канаде, например, Annan, A.P. и Davis J.L. применяли георадар в калийных шахтах Саскачевана, показывая, что можно картировать глинистые прослои и контролировать толщину соляных перекрытий над выработками [195]. В калийных и соляных шахтах ГРЛ особенно эффективен из-за низкой электропроводности соли. В Германии георадары стали применять для регулярного контроля толщины соляной перемычки, отделяющей выработку от вышележащих глин. Когда толщина падает ниже пороговых 0,6 м, риск обрушения кровли возрастает, и ГРЛ даёт возможность заблаговременно принять меры [195].

Другим важным направлением стала радиолокация угольных пластов. В 1981 Coon J.V. и др. опубликовали работу [199], где описали эксперименты в угольной шахте и показали, что короткие электромагнитные импульсы хорошо выявляют границы между углём и вмещающими породами на расстояниях до десятков метров. Эти результаты продемонстрировали перспективу применения ГРЛ в горном деле – для поиска рудных тел, прослеживания пластов и обнаружения пустот (хотя глубина была ограничена примерно 10-30 м из-за поглощения сигнала).

В 1980-х годах георадиолокация закрепились как признанный метод инженерной геофизики. Количество публикаций резко возросло, совершенствовались приборы. Появились более компактные и надёжные цифровые радары с расширенным частотным диапазоном и улучшенными средствами обработки сигналов. В СССР к тому времени накопился значительный опыт: под руководством М.И. Финкельштейна разрабатывали наземные импульсные георадары и авиационные системы для ледовой разведки [176]. В 1986 г. вышла

монография М.И. Финкельштейна, В.А. Кутева и В.П. Золотарёва [177], где обобщены результаты георадиолокационных исследований.

На Западе большое внимание уделяли повышению надёжности и разрешающей способности ГРЛ. В 1980-е стали разрабатываться первые модификации ГРЛ-аппаратуры, размещаемой в скважинах. Olsson O. и др. в 1987 г. [241] продемонстрировали возможность обнаружения пустот с помощью радара в скважине. К концу 80-х появились более совершенные скважинные комплексы (например, у Chen H.T. в 1989 г.) [197], что особенно актуально для горного дела: радар из буровых стволов может просматривать массив породы на большие глубины и объёмы по сравнению с наземным профилированием. К 1989 г. вышла работа Davis J.L., Annan A.P. [202], которая подвела итоги десятилетнего опыта применения ГРЛ в инженерной геологии. Авторы показали, что при правильной калибровке георадар даёт высокую точность картирования стратиграфии грунтов и пород, выделяя тонкие прослойки и границы.

В 1990-е начался бурный рост практического применения георадара в разных отраслях, включая горное дело. Аппаратура стала дешевле и надёжнее, появились промышленные модели, адаптированные для специфических условий рудников и карьеров. ГРЛ стал решать прикладные задачи: обнаружение обводнённых выработок, картирование разломов, зонирование руды. Появились адаптированные модификации – например, системы для непрерывного контроля положения горных комбайнов.

В Австралии и США велись работы по интеграции ГРЛ в оборудование проходки. Так, Ralston, J.C.; Hainsworth, D.W. (2000) [243] описали опыт внедрения георадара в действующей угольной шахте: ГРЛ заблаговременно фиксировал приближение к породной перемычке, улучшая управление комбайном. К началу 2000-х годов георадар уже широко применяли для обеспечения безопасности горных работ – обследования кровли на наличие пустот, поиска затопленных выработок и т.п. Американские инженеры сообщали об успешном выявлении затопленных штреков в соляных и поташных шахтах [248]. В США и Австралии для угольных шахт были созданы взрывозащищённые (исключающие

искрообразование) версии ГРЛ. Francke и др. [210, 211] представили конструкцию, которая крепится на комбайн и предупреждает о близлежащих заброшенных выработках или зонах водонасыщения. Это существенно повышает безопасность подземных работ.

Однако широкому внедрению мешала сложность обработки данных. Рост вычислительных возможностей ЭВМ позволил разрабатывать автоматические алгоритмы интерпретации, миграцию отражений, томографию и др. Методы обработки георадарных данных претерпели существенную эволюцию, особенно после появления первых цифровых систем в 1980-е. Примером пионерской работы является исследование [195], где была показана возможность эффективного отображения пластов калийной соли. В 1990-х начали внедряться алгоритмы, заимствованные из сейсморазведки: фильтрация, нормализация амплитуд, миграция гиперболических отражений. Hermance, J.F. [216] применил волновую миграцию и суммирование многократных сигналов ( $n$ -fold CMP) для повышения чёткости. Параллельно стали развиваться методы решения обратных задач (томография, полноволновая инверсия – FWI). Minet, J. и коллеги в начале 2010-х исследовали, как FWI восстанавливает диэлектрическую проницаемость грунта с высокой точностью [238].

К концу 1990-х – началу 2000-х георадарная аппаратура в горном деле вышла на новый уровень: появились многочастотные радары, способные одновременно работать в разных диапазонах. Увеличилась глубина проникновения (при условии слабопроводящих пород), активно развивались системы 3D-картирования. Новые комплексы начали обрабатывать данные почти в реальном времени, строить трёхмерные модели подземных структур. Например, в середине 90-х годов НПО «ИНФИЗПРИБОР» (г. Троицк Московской области) разработало переносной георадар «ГРОТ», который характеризовался повышенной мощностью и возможностью отображения радиолокационных профилей [2]. Также АО "Научно-технический центр системного моделирования (НТЦСМ)" применяли трехмерный радиолокатор подповерхностного зондирования «Дефектоскоп», который предназначается для обнаружения и распознавания различных объектов в твердых

и жидких оптически непрозрачных средах [60]. Существенный вклад в развитие георадарных технологий внесла российская компания «ЛОГИС», разработавшая линейку приборов «ОКО». Первая модель появилась в середине 1990-х годов, а уже к началу 2000-х была разработана модификация «ОКО-2», отличающаяся расширением рабочего диапазона частот (от 35 до 1700 МГц), возможностью замены антенных блоков для решения различных задач, увеличением глубины и точности зондирования, а также улучшением портативности и простоты эксплуатации. В дальнейшем, на базе «ОКО-2» были разработаны специализированные комплексы, включая скважинные, поисковые и многоканальные системы, что сделало серию «ОКО» одним из наиболее универсальных и востребованных решений на российском рынке геофизических исследований [13]. В СО РАН (А.А. Черемисин, М.И. Эпов, В.В. Оленченко и др.) создана сверхширокополосная система для георадиолокации низкоомных геологических сред [180].

Комплексное применение геофизических методов, включая георадиолокацию, способствует более точному определению строения и состояния массивов горных пород, что повышает безопасность ведения горных работ и качество добываемого полезного ископаемого [30]. ГРЛ широко используется для быстрого определения мощностей покрывающих пород и рудных тел. К примеру, на латеритных никелевых месторождениях можно оперативно картировать мощность латеритного слоя [209]. Аналогично в 2012 г. опубликованы результаты использования ГРЛ при разведке бокситов [212].

Существенный вклад в развитие метода внес коллектив Школы георадиолокации МГУ под руководством М.Л. Владова и А.В. Старовойтова, выполнивший многочисленные исследования на суше и в акваториях [18, 59, 139]. П.Н. Александров (ИФЗ РАН) развил теоретические основы метода, предложив решения обратных задач и способы интерпретации данных [3]. В ПФИЦ УрО РАН Ю.И. Степанов применил георадиолокацию для изучения мощности многолетнего льда и подземных наледей [136, 137]. В НИТУ МИСиС В.В. Набатов разработал технологию обнаружения пустот и дефектов за обделкой тоннелей [75].

Исследования в криолитозоне под руководством А.В. Омеляненко (Л.Г. Нерадовский, Л.Л. Федорова, К.О. Соколов, И.И. Христофоров, Д.В. Саввин и др.) подтвердили эффективность георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях. Ими предложены эмпирические зависимости диэлектрической проницаемости мерзлого суглинка от льдистости, разработаны различные методики параметрических измерений, проведения съемок с водной поверхности и в труднодоступных местах, исследованы особенности характеристик георадиолокационных сигналов [112, 80].

А.Ю. Дьяков и А.И. Калашник в 2021 г. [37, 55] подробно рассмотрели современные методы ГРЛ для диагностики горных пород и обеспечения безопасности рудников и карьеров. В частности, авторы описали методику выявления нарушенности массивов, поиска подземных пустот и зон водонасыщения. Описаны примеры успешного применения ГРЛ для контроля устойчивости крепи, обнаружения трещиноватых зон и оценки эффективности дренажных систем. В рудниках платиновых и золотых месторождений (ЮАР) применяется 3D-ГРЛ для выявления разломов и трещин в кровле – есть примеры работ 2019 г., где 3D-модели помогли оптимизировать системы крепления и снизить риск обвалов [221]. На угольных разрезах России (например, разрез «Заречный») ГРЛ позволяет оценивать структуру блока для более точного проектирования буровзрывных работ [5, 50, 83].

Современные методы обработки и интерпретации данных георадиолокации в горном деле также продолжают активно развиваться, обеспечивая более точное и информативное представление о состоянии горных пород и структур. Одним из ключевых направлений является усложнение моделей среды и внедрение трёхмерных алгоритмов, что позволяет получать детальные изображения распределения диэлектрических свойств массива пород.

Современные алгоритмы охватывают широкий спектр:

– Фильтрация шумов: устранение антенных помех, поверхностных шумов и выделение слабых сигналов. Zhu и др. [259] комбинирует метод главных

компонент с гауссовой кривизной, а Zhang и др. применяют взвешенную ядерную норму (WNNM) [258] для разделения сигнала и фона.

- Инверсия: от базовой миграции (Кирхгофа, FD, RTM) до полноволновой инверсии. Kaijun Wu и др. [256] показывают, что FWI даёт высокую точность оценки влажности почвы.

- 3D-визуализация: ранние исследования ограничивались 2D-профилями (В-сканами), но сейчас доступны объёмные модели (С-сканы) и интерактивные 3D-рендеры. Пример – работа в ЮАР [223], где 3D-объём помог локализовать опасные разломы в кровле выработки.

Исторически пакеты обработки были проприетарными (RADAN, ReflexW, Prism). В последние годы заметна тенденция к открытым решениям и воспроизводимости данных:

- RGPR — это свободное и открытое программное обеспечение, разработанное для чтения, экспорта, анализа, обработки и визуализации данных георадиолокации. Написанное на языке программирования R, RGPR поддерживает широкий спектр форматов данных от различных производителей георадаров, включая Sensors & Software, MALA, GSSI и другие. Пакет предоставляет функции для импорта данных, их визуализации, базовой обработки (например, фильтрации шумов) и более сложных операций, таких как миграция и деконволюция. RGPR активно развивается и доступен для скачивания на GitHub [217];

- GPRPy — это открытое программное обеспечение для обработки и визуализации данных георадиолокации, написанное на языке Python. Оно предоставляет интуитивно понятный графический интерфейс и набор инструментов для обработки данных, включая фильтрацию, коррекцию амплитуды, миграцию и создание 3D-визуализаций. GPRPy поддерживает различные форматы данных и ориентировано на пользователей, ищущих бесплатное и открытое решение для обработки данных GPR [242];

- grgMax — это открытое программное обеспечение для моделирования распространения электромагнитных волн, специально разработанное для применения в георадиолокации. Оно основано на методе конечных разностей во

временной области (FDTD) и позволяет моделировать сложные сценарии, включая взаимодействие электромагнитных волн с различными материалами и структурами. grgMax широко используется в научных исследованиях для численного моделирования и полноволновой инверсии данных ГРЛ [52, 253].

Такие инструменты облегчают внедрение продвинутых алгоритмов в промышленную практику, в том числе и в горном деле. В России разработаны специализированные программные комплексы для обработки и интерпретации данных георадиолокации:

– GeoReader — предназначен для автоматизированной обработки радарограмм протяжённых объектов дорожной сети, сочетая принципы систем автоматизированного проектирования (САПР). Он поддерживает работу с различными форматами данных отечественных и зарубежных георадаров и обеспечивает создание трёхмерных моделей подземной среды с возможностью экспорта в САПР/ГИС системы. GeoReader включён в реестр российского программного обеспечения и соответствует отраслевым нормативно-техническим требованиям [96].

– ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ — предоставляет эффективные инструменты для обработки зашумлённых георадарных данных, повышая информативность исследований. Он поддерживает работу с 2D и 3D массивами георадиолокационной информации, совместим с основными форматами георадарных файлов и предлагает бесплатные обновления, консультации и техническую поддержку [34, 35].

– GeoScan32 — специализированное программное обеспечение, предназначенное для управления георадарами серии «ОКО» и обработки полученных данных. Базовая версия GeoScan обеспечивает управление георадаром во всех режимах и обработку информации с использованием универсальных методов без применения трёхмерной графики. Профессиональная версия GeoScan32 предоставляет расширенные возможности, включая гибкую настройку фильтров и режимов обработки радарограмм, что особенно полезно для опытных пользователей [213].

Сегодня георадиолокация в горном деле – это целый комплекс аппаратно-программных решений. Аппаратура быстро эволюционирует: растёт мощность импульсов, совершенствуются антенны, внедряются многочастотные и широкополосные системы. Развитие вычислительной техники (GPU, высокопроизводительные кластеры) позволяет проводить 3D-инверсию данных в реальном времени. Появляются автономные комплексы – от беспилотных колёсных платформ, движущихся по забою, до летательных дронов для съёмки пород отвала и поверхности карьеров [228].

Методы обработки всё глубже интегрируются с искусственным интеллектом. Нейросети автоматизируют не только обнаружение целей, но и построение скоростных разрезов, классификацию геологических границ. Это даёт возможность оперативно реагировать на аварийно-опасные зоны или корректировать направление горных работ «на лету».

Ограничением ГРЛ по-прежнему остаётся сильное затухание сигнала в высокопроводящих средах (влажные глины, графитовые сланцы, руды с высоким содержанием металлов и т.п.). Однако даже в таких условиях при подборе оптимальных частот и мощных импульсов возможно получение ценной информации на малых глубинах.

Для горного дела значение ГРЛ неуклонно растёт: метод решает задачу быстрого и ненарушающего обследования массива пород, контроля безопасности подземных и открытых горных работ, разведки неглубоких рудных зон и локальных пустот. Развитие ГРЛ-инструментов и программного обеспечения (от Filter и Migration до FWI и нейросетей) делает метод всё более доступным и точным. Наряду с этим сохраняются научные вызовы, связанные с проникновением в сложные (высокопроводящие) среды и интерпретацией данных, с учетом свойств и состояния исследуемого массива пород. Тем не менее, георадиолокация уже сегодня является высокоэффективным средством для геологической и горнотехнической диагностики. Она даёт возможность быстрее и безопаснее осваивать недра, обнаруживать опасные зоны и контролировать состояние массива горных пород. Более чем столетняя эволюция – от ранних патентов до

современного широкополосного 3D-сканирования – показывает, что потенциал ГРЛ далёк от исчерпания. Можно ожидать, что в ближайшие годы этот метод ещё более укрепит свои позиции как универсальный и гибкий инструмент разведки и мониторинга в горном деле.

### **Выводы к главе 1**

Полная и оперативная информация о неоднородностях строения разрабатываемого массива горных пород, о наличии подземных геокриологических объектов, об участках развития опасных криогенных процессов необходимы для рационального планирования горных работ, выбора эффективных технологических схем и безопасного ведения горных работ. Указанную информацию получают с использованием различных геологических, маркшейдерских и геофизических методов, причем именно последние становятся все более доминирующими. В условиях распространения многолетнемерзлых пород наиболее эффективны дистанционные методы высокочастотной электроразведки, из которых, наиболее перспективным, представляется метод георадиолокации.

Анализ современного состояния метода георадиолокации показал, что значительные возможности метода георадиолокации на практике реализуются не полностью. Особенности природно-климатических условий криолитозоны, многообразие геологического строения месторождений, изменчивость свойств и состояния массива пород при ведении горных работ требуют разработки новых методических подходов к решению задач изучения горно-геологических условий, адаптации современных и внедрения новых технологий.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД КРИОЛИТОЗОНЫ

### 2.1 Моделирование процесса распространения высокочастотных электромагнитных волн в условиях неоднородных сред

Для исследования и обоснования эффективности метода георадиолокации, выбора методов обработки, интерпретации данных вводится понятие «георадиолокационная модель» (ГРЛМ) объекта исследований. По аналогии термину физико-геологической модели (ФГМ), который был введен в употребление Г.С. Вахромеевым и А.Ю. Давыденко [15], георадиолокационная модель (ГРЛМ) представляет собой сложную конструкцию, состоящую из 3-х частей. В 1-й части строится геологическая модель, которая обобщенно описывает состав, структуру и геометрию изучаемого объекта. Вторая часть – это петрофизическая модель, описывающая распределение электрофизических и геологических свойств в пространстве, плане и разрезе. Третья часть – это радарограмма, сформированная в результате компьютерного или физического или натурального моделирования, на которой отображаются характер георадиолокационных волновых полей, их интенсивность, морфология, аномалии и различные помехи [119, 205]. Результаты моделирования способствуют обоснованию эффективности метода георадиолокации, разработке технологий проведения полевых работ, созданию алгоритмов обработки данных и определению интерпретационных признаков волновых картин (радарограмм).

Степень детализации модели, выбор инструмента моделирования зависит от решаемой задачи. При построении георадиолокационных моделей обобщение геологического строения и анализ геофизических свойств массива горных пород проведены в пределах Субарктической и Умеренной климатических зон Якутии.

## 2.1.1 Электрофизические свойства горных пород россыпных месторождений криолитозоны

Анализ электрофизических свойств горных пород россыпных месторождений Якутии, в частности таких параметров, как скорость распространения электромагнитных волн –  $V$  (м/нс) и удельное кажущееся сопротивление –  $\rho_k$  (Ом\*м), проводился по публикациям Фролова А. Д., Седова Б. М., Якупова В. С. [120, 178, 191], а также по материалам натурных исследований, проведенных специалистами Института горного дела Севера СО РАН совместно с отделом геофизики АО «Алмазы Анабара».

*Субарктическая климатическая зона.* По данным дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП) на участке «Лог 405» алмазоносного россыпного месторождения «Маят-Водораздельный» определены 4 аномальные зоны с пониженными значениями электросопротивлений от 214 до 781 Ом\*м. Соответствующая карта сопротивлений ДЭМП (разнос 40 м, частота  $f = 1125$  кГц) отображена на рисунке 2.1.

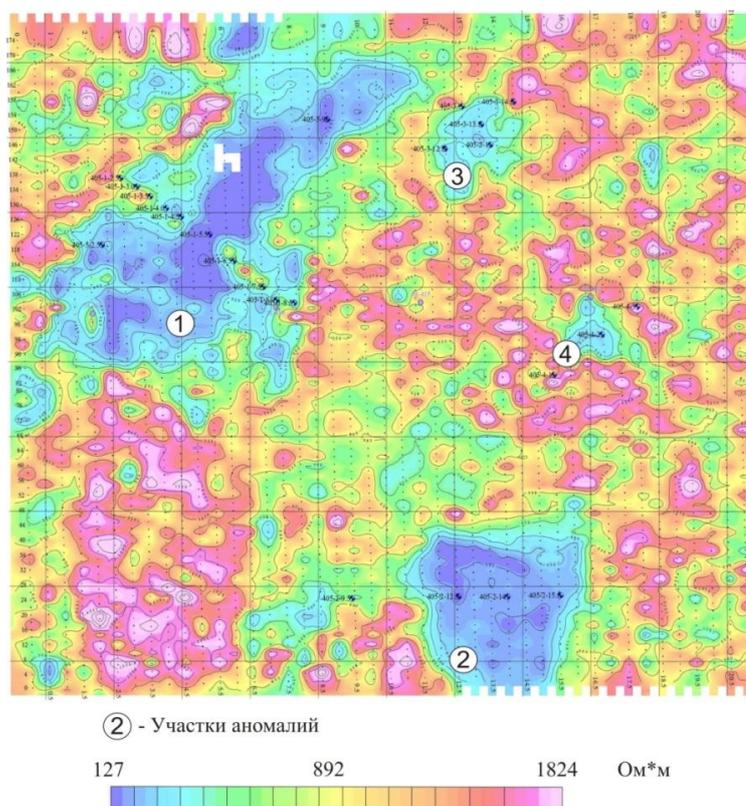


Рисунок 2.1 – Карта сопротивления ДЭМП на разnose 40 м на участке «Лог 405», россыпного месторождения алмазов «Маят-Водораздельный» [152]

Значения удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород, установленные методами электроразведки на постоянном токе в работах Боголюбова А.Н., Акимова А.Т., Фролова А.Д. и др. [7, 9, 25, 178, 188], приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  горных пород по результатам электроразведки на постоянном токе [7, 25, 178, 188]

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

Зависимости между относительной диэлектрической проницаемостью и УЭС представлены по данным полевых исследований, выполненных Якуповым В. С. в Якутской алмазодобывающей провинции на постоянном токе [190] (Рисунок 2.2).

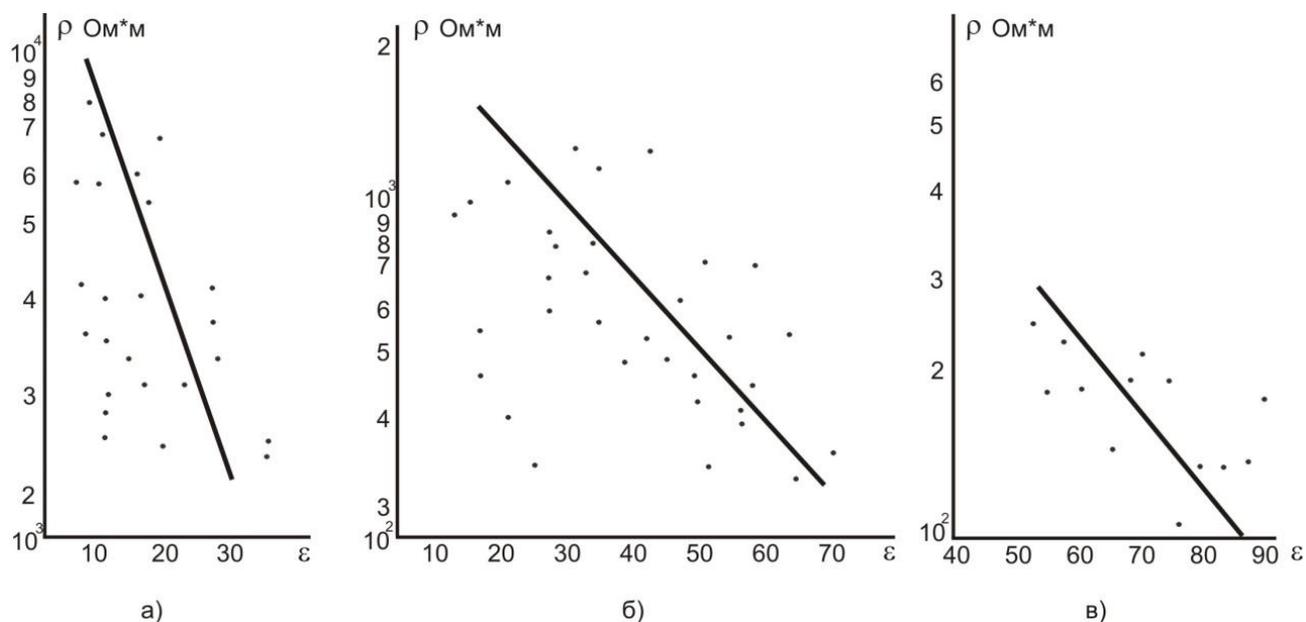


Рисунок 2.2 – Относительная диэлектрическая проницаемость и удельное электрическое сопротивление мёрзлых горных пород Якутской алмазодобывающей провинции:

а) 1 группа, б) 2 группа, в) 3 группа

Исходя из результатов анализа физических характеристик, выделяются три типа пород (рисунок 2.2):

1. Тип I. Высокоомные породы (рисунок. 2.2а)
  - Состав: Мерзлые глинистые отложения (пресноводное насыщение, малая удельная поверхность).
  - УЭС: 2000–10000 Ом·м.
  - Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ): 5–30.
2. Тип II. Породы со средними показателями (рисунок 2.2б)
  - Состав: Мерзлые микропористые разности (кимберлиты, мергели), предположительно — талые глины.
  - УЭС: 300–1500 Ом·м.
  - Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ): 20–70.
3. Тип III. Низкоомные породы (рисунок 2.2в)
  - Состав: Микропористые засоленные и грубокластические породы различного литологического состава.
  - УЭС: менее 300 Ом·м.
  - Диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ): 50–80.

*Методика определения скоростных характеристик.* Для оценки скорости распространения электромагнитных волн ( $V$ , м/нс) в естественном залегании мерзлых пород верхней части разреза применялась методика общей глубинной точки (ОГТ). Работы проводились в пределах северной части Якутской алмазодобывающей провинции, включая участки «Новогодний» и «Маят-Водораздельный», а также бассейны рек Молодо и М. Куонамка.

Аппаратной базой служил георадар серии «ОКО-2», укомплектованный антенным блоком АБ-150 с центральной частотой 150МГц [101, 152, 163]. Точки зондирования располагались в непосредственной близости от разведочных скважин. Обработка данных, полученных методикой ОГТ с изменением разноса антенн, позволила рассчитать для исследуемой среды как диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon'$ ) так и скоростные параметры ( $V$ ).

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- на участке р. Молодо результаты измерений методом электроразведки показали, что в талых глинистых отложениях кажущееся сопротивление составляет  $0,3 \cdot 10^3$  Ом\*м, а в мерзлых изменяется в пределах  $0,6 \cdot 10^3$ - $1,5 \cdot 10^3$  Ом\*м. Методом георадиолокации определено, что скорость волн в мерзлых грунтах щебня и гравия составляет 0,144-0,169 м/нс.

- на участке Новогодний реки Маят исследования методом электроразведки показали, что кажущееся сопротивление в мерзлых глинистых отложениях составляет  $1,2 \cdot 10^3$ - $4 \cdot 10^3$  Ом\*м, а в талом песке варьируется от  $0,8 \cdot 10^3$  до  $10^3$  Ом\*м. Методом георадиолокации определено, что скорость волн в мерзлых глинистых отложениях составляет 0,127-0,158 м/нс, а в мерзлом песке – 0,157-0,160 м/нс.

- на участке 405 исследования методом электроразведки показали, что в талых глинистых отложениях кажущееся сопротивление варьируется от  $3 \cdot 10^2$  до  $0,9 \cdot 10^3$  Ом\*м, а в мерзлых глинистых отложениях – от  $3,5 \cdot 10^2$  до  $7 \cdot 10^3$  Ом\*м. Методом георадиолокации определено, что скорость волн в талых глинистых отложениях составляет 0,076-0,092 м/нс, а в мерзлых глинистых отложениях – 0,106-0,169 м/нс.

- на участке Верхняя Кула исследования методом электроразведки показали, что в талых глинистых отложениях кажущееся сопротивление варьируется от  $0,16 \cdot 10^3$  до  $0,46 \cdot 10^3$  Ом\*м. Методом георадиолокации определено, что скорость волн в талых глинистых отложениях составляет 0,069-0,087 м/нс, а в мерзлых глинистых отложениях – 0,106-0,148 м/нс.

- на участке реки М. Куонамка метод георадиолокации показал, что скорость волн в мерзлом мелко-среднезернистом песке составляет 0,146 м/нс, а в мерзлом глинистом сланце составляет 0,045 м/нс.

*Умеренная климатическая зона.* Электрофизические свойства горных пород представлены результатами экспериментального изучения изменчивости электрофизических параметров мерзлых толщ методом вызванной поляризации (ВП) Мельниковым В.П. [72]. Электроразведочные работы были проведены в районе Центральной Якутии от пос. Чурапча до пос. Мындагай. По результатам работы построены интерпретационные разрезы по удельным электрическим

сопротивлениям ( $\rho_k$ ) и поляризуемостью ( $\eta_k$ ) (рисунок 2.3). По геологическому строению от пикета ПК 0-25 залегают суглинки, имеющие значения электрических сопротивлений 800-3600 Ом\*м, от ПК 61-71 залегают песчано-галечные отложения, составляющие  $\rho_k$  400-2400 Ом\*м.

На основе полевых георадиолокационных данных с участка «Древняя Долина» месторождения руч. Джеконда, г. Алдан, Республика Саха (Якутия) рассчитана скорость электромагнитных волн в рыхлых отложениях [61]. Для валунно-галечных отложений с песком и глиной в талом состоянии она составила – 0,080 м/нс. Расчет скорости выполнен по вещественной части диэлектрической проницаемости, определенной по волновому образу локального объекта (валуну в толще рыхлых отложений) в соответствии с методикой применения процедуры «гипербола», входящей в состав программного обеспечения «GeoScan32». Установлено, что на данном участке, до глубины 6 м вещественная часть диэлектрической проницаемости талых горных пород равна 14.

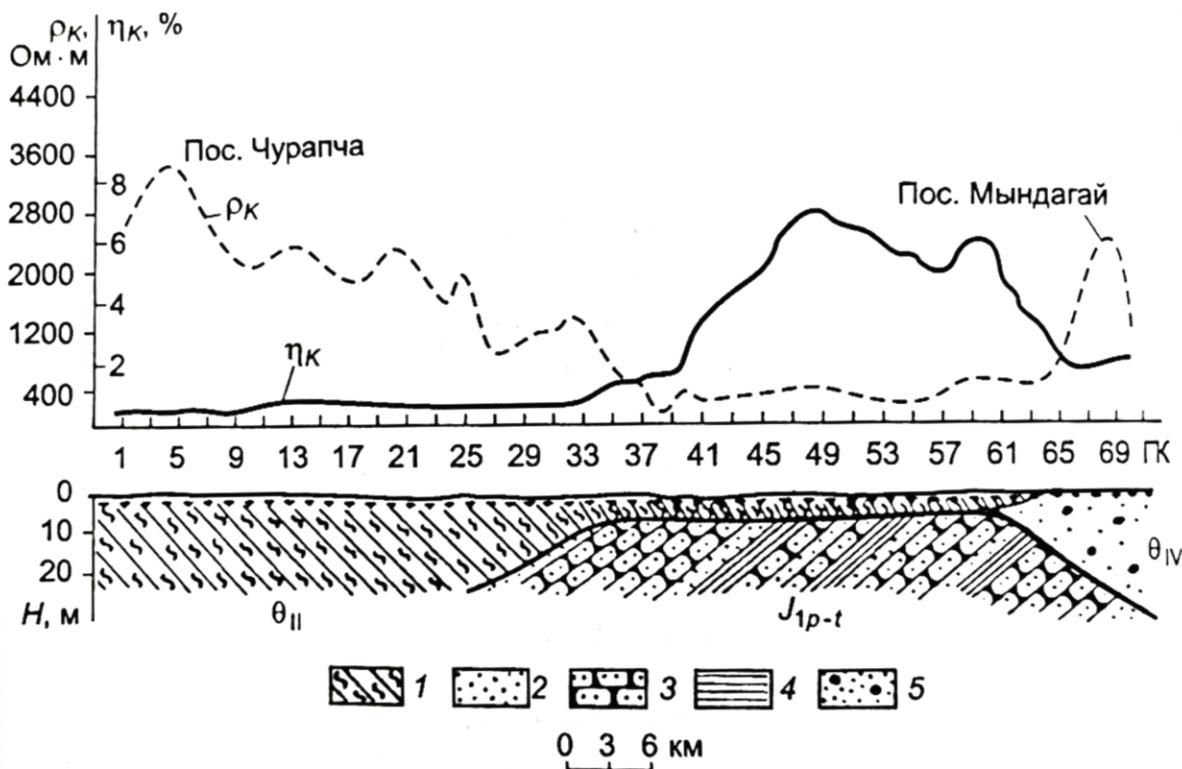


Рисунок 2.3 – Распределение  $\eta_k$  и  $\rho_k$  по профилю Чурапча – Мындагай:  
 1 – суглинки, 2 – пески, 3 – песчаники, 4 – сланцы, 5 – песчано-галечные отложения (по В. П. Мельникову)

Аллювиальные отложения, слагающие долину р. Большой Куранах, представлены серыми песками и валунно-галечными образованиями, мощностью от 4 до 12 м. Содержание крупнообломочного материала достигает 30% при содержании илесто-глинистой фракции 40-60% с незначительными включениями валунов размером 2-4 м. Такое строение россыпи позволяет также использовать возможности метода георадиолокации для определения вещественной части диэлектрической проницаемости по волнам дифракции на локальных объектах, и тем самым масштабировать по глубине радарограммы [63]. Для заверки использована ближайшая к георадиолокационному профилю скважина и определены следующие свойства:  $\varepsilon' = 8,3-8,5$  ( $V = 0,103-0,104$  м/нс) для галечно-эфельных отложений (отработка прошлых лет).

На россыпном месторождении золота р. Аллах-Юнь полевые георадиолокационные данные по изучению рельефа плотика получены ранней весной в период максимального промерзания дражного полигона. Мощность рыхлых отложений на месторождении небольшая (торфа – 2,7-10 м, пески – 0,4-5,2 м) и доступна для зондирования георадаром. Присутствие валунов (20-30 см, местами до 50 см) предполагает возможность регистрации гипербола на волновой картине, следовательно и определение электрофизических свойств горных пород. Заверка полученных данных на участке дражного полигона выполнена по трем скважинам, расположенным на отдельных профилях георадиолокации. Установлено, что вещественная часть диэлектрической проницаемости разнозернистых песчаников с алевролитами и галькой в мерзлом состоянии находится в пределах:  $\varepsilon' = 3,7-4,3$  ( $V = 0,155-0,145$  м/нс) – скв. 178;  $\varepsilon' = 3,85-3,92$  ( $V = 0,153-0,152$  м/нс) – скв. 217;  $\varepsilon' = 3,09-7,29$  ( $V = 0,171-0,111$  м/нс) – скв. 213.

В результате определены характерные значения электрофизических свойств горных пород умеренной климатической зоны Якутии, значения которых приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Геофизические свойства дисперсных пород, усредненные для Умеренной климатической зоны

Участки исследования	Электроразведка, $\rho_k$ , Ом*м		Георадиолокация V, м/нс		Горные породы
	талые	мерзлые	талые	мерзлые	
<i>1) Западная часть:</i>					
г. Мирный уч. Тас-Юрях	133-257	1009-1681			
<i>2) Центральная часть:</i>					
Угольный разрез «Кангалаский»	100	2000	0,110 0,131 0,064	-	песок средний
	100	2000			Песчаник различного гранулометрического состава
			0,110 0,056 0,099	-	песок мелкий
с. Чурапча		800-3600	0,086	0,15	Суглинки Супеси
г. Якутск	10-250	400-5000	0,077	0,15	Супеси Пески Суглинки
с. Амга	39	10 <sup>4</sup>	0,106	0,134	Суглинки Пески
<i>3) Восточная часть:</i>					
р. Аллах-Юнь артель старателей «Дражник»				0,155 0,145 0,153 0,152 0,111	Разнозернистые песчаники с алевролитами и галькой
Томпонский район (а/д Кольма 509 км)	10-250	800-1050	0,1	0,122	Суглинки Пески Щебнистый грунт
<i>4) Южная часть:</i>					
Уч. р. Б. Куранах		1,2*10 <sup>3</sup>	0,105	0,107	Галечно-эфельные отложения. (Отработка прошлых лет) Галька (отработка)
			0,093 0,117	-	Эфель (отработка) (промытые пески)
			0,103 0,104	-	Галечно-эфельные отложения. (Отработка прошлых лет)
Участок Муравьевский уч. Юрский			0,062- 0,084	0,15- 0,122	Пески, супеси, суглинки, торфа, илы, алевролиты, песчаники

## 2.1.2 Электродинамическое моделирование георадиолокационных зондирований

### *Электродинамическое одномерное моделирование.*

При решении одномерных задач реальная среда аппроксимируется последовательностью однородных слоев известной мощности и заданными диэлектрическими свойствами в точке расположения приемной антенны. В настоящее время для решения задач электродинамики используются такие методы, как метод конечных разностей во временной области (FDTD) [227, 230, 249, 257], матриц линий передач (TLM) [219], импедансного аналога электромагнитного пространства (ИАЭП) [51] и другие. К недостаткам всех этих методов следует отнести сложность учета дисперсии, потребность их в значительных вычислительных ресурсах и использование рекурсивных методов расчета.

Дифракционная теория распространения гауссовых пучков в квазиоптическом приближении была сформулирована на матричном языке с помощью правила, введенного Н. Kogelnik [224]. Из-за малой величины оптического промежутка матрица передачи (обозначаемая в англоязычной технической литературе как ABCD-матрица) луча является дифференциальной матрицей и описывает передачу луча через участок  $\Delta x$ . Из-за параксиальности лучей можно считать их квази-Т-волнами.

Электродинамическое моделирование с использованием дифференциальных ABCD-матриц основано на представлении малых участков среды в виде матриц передачи, полученных непосредственно из уравнений Максвелла [144]. Это позволяет записать ABCD-матрицы участков и слоев, а их перемножение – матрицу передачи всей среды. Поэтому метод дифференциальных ABCD-матриц – это метод электродинамического моделирования, основанный на построении аналогов цепей в виде элементов с сосредоточенными и распределенными параметрами [143, 146]. Концептуально рассматриваемый подход обнаруживает определенное сходство с методом матриц линий передачи (TLM), а принципиальное отличие заключается в локализации вычислительного процесса: расчеты ведутся не во временной, а в частотной (спектральной) области. Вместо волновых матриц

алгоритм оперирует классическим формализмом матриц передачи, что обеспечивает корректный учет эффектов поляризации и частотной дисперсии. Математический базис метода строится на системе уравнений Максвелла в дифференциальной форме, где осуществляется переход к пространству комплексных амплитуд. Введение комплексных значений диэлектрической и магнитной проницаемостей позволяет полноценно моделировать энергетические потери в среде. При условии гармонического характера колебаний в однородном пространстве операция временного дифференцирования формально заменяется умножением на множитель  $j\omega$ , что позволяет трансформировать исходную систему уравнений к следующему виду:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{E} &= -j\omega \dot{H} \\ \operatorname{rot} \dot{H} &= j\omega \dot{E} \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $\dot{\epsilon} = \epsilon_0 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right)$ ,  $\dot{\mu} = \mu_0 \dot{\mu}_r - j\mu'$  - комплексные электрическая и магнитная проницаемости среды, соответственно,  $\sigma$ ,  $\mu'$ ,  $\omega$  - проводимость среды, магнитные потери и круговая частота, соответственно.

Магнитные потери  $\mu'$  в среде определяют потери на гистерезис и вихревые токи, которые пропорциональны силе тока, частоте и квадрату частоты. В наших расчетах магнитные потери можно не учитывать и в дальнейшем будем принимать  $\mu' = 0$ ,  $\mu_r = 1$ .

Уравнения электродинамики в дифференциальной форме позволяют описать распространение электромагнитной волны (ЭМВ) в ячейке однородной среды, размеры которой стремятся к нулю. Тогда под ячейкой среды можно понимать часть среды, линейные размеры которой меньше самой короткой длины волны. Следовательно, размер ячейки понятие относительное и определяется частотным диапазоном. Связь размеров ячейки с частотой и длины волны мы рассмотрим далее.

Если нужно рассмотреть распространение ЭМВ в протяженной среде, когда её линейные размеры сравнимы или больше длины волны, то такие протяженные среды следует рассматривать как соединение множества ячеек. Связь между ними описывается дифференциальными матрицами передачи, или ABCD-матрицами.

Если эти ячейки соединены последовательно (не обязательно расположенными по прямой) и представляют собой каскадное соединение ячеек, то это одномерная или 1D-среда. Для случая одномерной среды вместо понятия «ячейка» целесообразнее использовать термин «участок». При этом каждая ячейка (участок) может иметь свои электрофизические свойства. Двухмерная или 2D-среда образуется из 1D-сред их параллельным соединением, образуя плоскость. Трехмерная или 3D-среда образуется параллельным соединением 2D-сред (рисунок 2.4). Могут существовать и дробные среды, например, 1,5D-среда, 2,5D-среда. Это среды, которые не полностью описывают среду в каком-то направлении. Например, при лучевом методе каждый луч образует участок 1D-среды, но пространство между лучами остается не описанным. Это пример 1,5D-среды.

Так как размеры ячеек (участков) малы, а размеры сред велики, приходится ограничиваться конечными размерами исследуемых участков среды, то есть количество ячеек (участков) ограничено. Чтобы учесть влияние не вошедшей части среды нужно задать граничные условия по границам исследуемого участка среды.

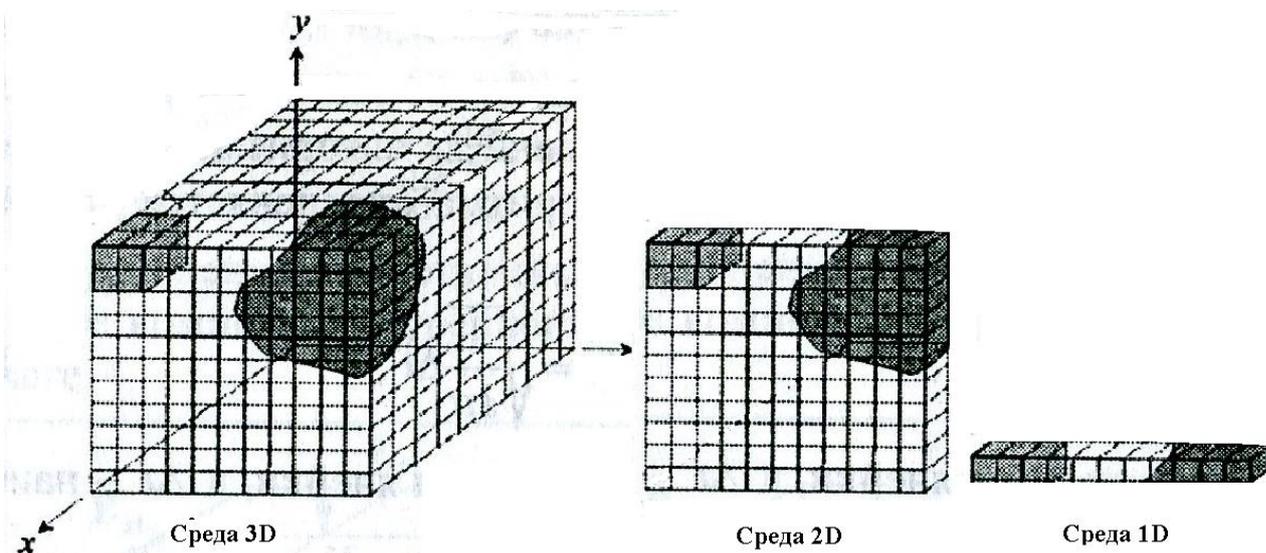


Рисунок 2.4 – Трехмерная (3D), двухмерная (2D) и одномерная (1D) среды

Следовательно, электродинамическое моделирование с использованием дифференциальных ABCD-матриц (далее ABCD-матриц) основано на описании электромагнитных свойств малых ячеек среды в виде классических матриц передачи, полученных непосредственно из уравнений Максвелла.

**Модель участка одномерной среды и ее дифференциальная матрица передачи.** Пусть в однородной среде с потерями в направлении  $z$  распространяется гармоническая плоская ЭМВ или Т-волна [187]. Если выбрать такую систему координат, что вектор электрического поля совпадал с направлением  $x$ , а вектор магнитного поля с направлением  $y$ , то из (2.1) следует, что эта волна описывается как:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \dot{E}_x}{\partial z} &= -j\omega\dot{\mu}\dot{H}_y \\ \frac{\partial \dot{H}_y}{\partial z} &= j\omega\dot{\epsilon}\dot{E}_x\end{aligned}\quad (2.2)$$

Переходя к конечным разностям,  $\partial z \rightarrow \Delta z$ , систему дифференциальных уравнений (2.2) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{E}_x(z + \Delta z) &= \dot{E}_x(z) - j\omega\dot{\mu}\dot{H}_y\Delta z \\ \dot{H}_y(z + \Delta z) &= -j\omega\dot{\epsilon}\dot{E}_x\Delta z + \dot{H}_y(z)\end{aligned}\quad (2.3)$$

Уравнения (2.3) описывают передачу на малое расстояние  $\Delta z$  электрического и магнитного полей при прохождении Т-волны в направлении  $z$ . Поэтому эту передачу можно описать в виде дифференциальной ABCD-матрицы, как это сделано в [224]. В соответствии с теорией многополюсников [142] уравнения (2.3) в матричном виде запишутся следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x(z + \Delta z) \\ \dot{H}_y(z + \Delta z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\dot{Z}\Delta z \\ -\dot{Y}\Delta z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_x(z) \\ \dot{H}_y(z) \end{bmatrix}\quad (2.4)$$

где  $\dot{Z} = j\omega\dot{\mu}$ ,  $\dot{Y} = j\omega\dot{\epsilon}$ .

Если среда однородна, то передача ЭМВ в обе стороны одинакова. Тогда в соответствии с [144] обратная дифференциальная ABCD-матрица запишется как

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x(z) \\ \dot{H}_y(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \cdot \Delta z \\ \dot{Y} \cdot \Delta z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_x(z + \Delta z) \\ \dot{H}_y(z + \Delta z) \end{bmatrix}\quad (2.5)$$

Так как рассматривается однородная среда и отраженных волн нет, волновое сопротивление  $\dot{Z}_B$ , в этом случае, можно из (2.5) определить как:

$$Z_B = \frac{E(z + \Delta z)}{H(z + \Delta z)} = \frac{E(z)}{H(z)} = \frac{Z_B + Z \Delta z}{Z_B Y \Delta z + 1} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.6)$$

Известно, что постоянная распространения  $\dot{\gamma}$  в этом случае определяется, например, согласно [257], как:

$$\dot{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{\dot{Z}\dot{Y}} \quad (2.7)$$

а скорость волны:

$$v_c = \frac{\omega}{\beta} \quad (2.8)$$

Если потери отсутствуют и  $\mu_r = 1$ , то скорость волны [257]:

$$v_c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

где  $c \approx 2.998 \cdot \frac{10^8 \text{ м}}{\text{с}}$ .

Таким образом, малый участок однородной одномерной среды можно описать в виде дифференциальной ABCD-матрицы. Отсюда следует, что модель отрезка однородной одномерной среды можно описать двумя способами.

Первый способ. Когда модель отрезка однородной одномерной среды представляет собой каскадное соединение одинаковых ABCD-матриц. Тогда результирующая матрица передачи  $[a]_{\Sigma}$  для такой среды запишется как

$$[a]_{\Sigma} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \cdot \Delta z \\ \dot{Y} \cdot \Delta z & 1 \end{bmatrix}^n \quad (2.10)$$

где  $n=L/\Delta z$ ,  $L$ —мощность среды.

Второй способ. Во многих работах, в частности в [144, 163], показано, что классическую матрицу передачи однородной одномерной протяженной среды можно описать через гиперболические функции (учитывая, что Т-волны распространяются и в среде и в линиях передачи) и результирующая матрица передачи  $[a]_{\Sigma}$  для такой среды запишется как:

$$[a]_{\Sigma} = \begin{bmatrix} ch\dot{\gamma}L & Z_B sh\dot{\gamma}L \\ \frac{sh\dot{\gamma}L}{Z_B} & ch\dot{\gamma}L \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Отметим, что в работе [6] было показано, что такая матрица передачи однородной среды представляет собой предел каскадного соединения  $n$  дифференциальных ABCD-матриц. Прямая проверка показывает это при  $n \rightarrow \infty$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \cdot \Delta z \\ \dot{Y} \cdot \Delta z & 1 \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} ch\dot{\gamma}L & Z_c sh\dot{\gamma}L \\ \frac{sh\dot{\gamma}L}{Z_c} & ch\dot{\gamma}L \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

### ***Модель неоднородной одномерной среды.***

Теория многополюсников позволяет рассмотреть границу раздела двух разных одномерных сред как точку соединения двух четырехполюсников с разными волновыми сопротивлениями [6].

Пусть две полубесконечные одномерные среды с волновыми сопротивлениями  $\dot{Z}_{B1}$  и  $\dot{Z}_{B2}$  имеют общую границу. Пусть в первой среде распространяется падающая Т-волна и нормально падает на границу второй среды, проходит в нее и генерирует в первой среде отраженную волну, а во второй – прошедшую. Если напряженность электрического и магнитного полей вблизи границы раздела в первой среде равна  $\dot{E}_1$  и  $\dot{H}_1$ , а во второй среде  $\dot{E}_2$  и  $\dot{H}_2$ , то при нормальном падении ЭМВ на границу раздела выполняются следующие граничные условия [187]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}_2, \\ \dot{H}_1 &= \dot{H}_2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Отсюда следует, что прошедшая волна  $E_2$ :

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= \dot{E}_{1p} + \dot{E}_{1o}, \\ \dot{H}_2 &= (\dot{E}_{1p} - \dot{E}_{1o})\dot{Z}_{B1}, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где индексы « $p$ » и « $o$ » соответствуют падающей и отраженной волнам в первой среде [187].

Следовательно, прошедшая волна  $\dot{E}_2$  во второй среде равна сумме падающей  $\dot{E}_{1p}$  и отраженной  $\dot{E}_{1o}$  волн в первой среде, а их величины, выраженные через прошедшую волну, запишутся как:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{1p} &= \dot{E}_2(1 + \dot{Z}_{B1}/\dot{Z}_{B2})/2, \\ \dot{E}_{1o} &= \dot{E}_2(1 - \dot{Z}_{B1}/\dot{Z}_{B2})/2.\end{aligned}\tag{2.15}$$

Отсюда коэффициенты отражения  $R$  и прохождения  $T$ :

$$\begin{aligned}\dot{R} &= \frac{\dot{E}_{1o}}{\dot{E}_{1p}} = \frac{\dot{Z}_{B2} - \dot{Z}_{B1}}{\dot{Z}_{B2} + \dot{Z}_{B1}}, \\ \dot{T} &= \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_{1p}} = \frac{2\dot{Z}_{B2}}{\dot{Z}_{B2} + \dot{Z}_{B1}} = R + 1.\end{aligned}\tag{2.16}$$

Следовательно, такая модель позволяет описать отрезок одномерной среды как состоящую из ячеек с разными электрофизическими свойствами. Последовательно соединяя участки, получаем модель протяженной неоднородной одномерной среды. Эта модель представляет из себя каскадное соединение разных дифференциальных ABCD-матриц, перемножение которых дает результирующую ABCD-матрицу протяженной среды  $[a]_\Sigma$ :

$$[a]_\Sigma = \prod_{i=1}^N [a]_i\tag{2.17}$$

Вопросы точности и сходимости уравнения (2.17) рассматривались в работе [147]. Ввиду того, что отрезки реальных сред протяженные, матрицу передачи таких отрезков можно записать через (2.11) как:

$$[a] = \begin{bmatrix} ch\dot{\gamma}L & Z_B sh\dot{\gamma}L \\ sh\dot{\gamma}L/Z_B & ch\dot{\gamma}L \end{bmatrix},\tag{2.18}$$

где  $l$  – длина отрезка,  $Z_B$ ,  $\gamma$  – волновое сопротивление и постоянная распространения отрезка среды.

Чтобы учесть влияния на расчеты не рассматриваемых участков, необходимо ввести граничные условия по краям. На рисунке 2.5 показано каскадное соединение четырехполюсников, где  $[a]_1, [a]_2, \dots, [a]_n$  – ABCD- матрицы участков среды и граничное условие слева:  $E_0$  – источник ЭМВ,  $Z_0$  – внутреннее

сопротивление источника, и справа:  $Z_{n+1}$  – волновое сопротивление  $n+1$  среды,  $E_i$  и  $H_i$  – напряженность электрического и магнитного полей в точке  $x_i=1\dots n+1$ ,  $l$  – мощность отрезка среды.

Здесь условия распространения Т-волны определяются граничными условиями среды слева и справа, которые записываются как:

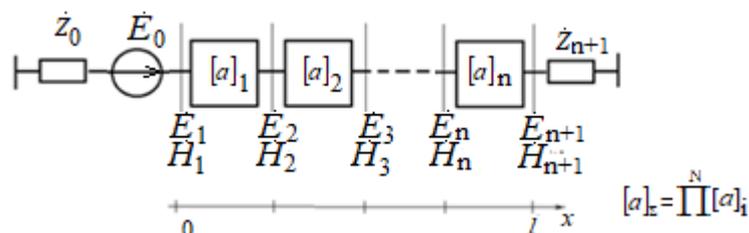


Рисунок 2.5 – Модель одномерной неоднородной среды как каскадное соединение четырехполюсников

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}_0 - \dot{Z}_0 \dot{H}_1, \\ \dot{E}_{n+1} &= \dot{Z}_{n+1} \dot{H}_{n+1}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Решая совместно уравнения (2.17) и (2.19) находим амплитуды электрического и магнитного поля справа и слева:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{n+1} &= \frac{\dot{E}_0}{a_{11} \dot{Z}_{n+1} + a_{12} + a_{21} \dot{Z}_1 \dot{Z}_{n+1} + a_{22} \dot{Z}_1}, \\ \dot{E}_{n+1} &= \dot{Z}_{n+1} \dot{H}_{n+1}, \\ \dot{H}_1 &= a_{21} \dot{E}_{n+1} + a_{22} \dot{H}_{n+1}, \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_0 - \dot{Z}_0 \dot{H}_1. \end{aligned} \quad (2.20)$$

где  $a_{ij}$  – элементы результирующей матрицы  $[a]_\Sigma$ .

### ***Применение одномерной модели среды.***

Одномерная модель позволяет, например, определять входные сопротивления различных многослойных дисперсионных сред [6], рассчитать картины напряженности электромагнитного поля в такой среде [224], распространения электромагнитных импульсов при георадиолокации [144]. Для этого достаточно сформировать результирующий четырехполюсник и задать граничные условия по концам одномерной среды.

Для расчета волнового сопротивления трехслойной подповерхностной среды разработана программа в среде Mathcad. На рисунках 2.6, 2.7 показаны результаты для среды, состоящей из трех слоев со следующими параметрами для:

$$1 \text{ слоя: } \varepsilon_1 = 5, \mu_1 = 1, \sigma_1 = 10^{-2} \text{ см, } l_1 = 5 \text{ м;}$$

$$2 \text{ слоя: } \varepsilon_2 = 5, \mu_2 = 1, \sigma_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см, } l_2 = 20 \text{ м;}$$

$$3 \text{ слоя: } \varepsilon_3 = 5, \mu_3 = 1, \sigma_3 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см, } l_3 = 1 \text{ м.}$$

На рисунке 2.6 приведена зависимость модуля входного сопротивления  $ZI(\text{Ом})$  подповерхностной трехслойной среды от частоты (МГц). Результаты расчета  $Z_{\text{вх}}$  показали его полную эквивалентность другим методам, в том числе электрофизическим [189].

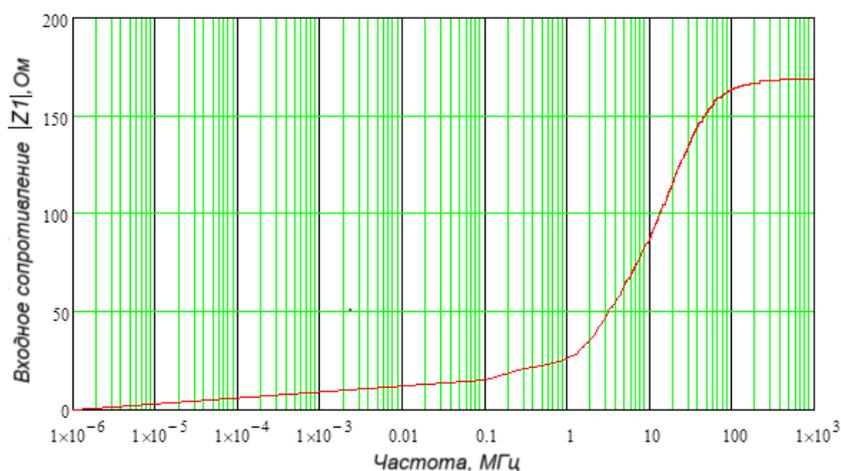


Рисунок 2.6 – Зависимость модуля входного сопротивления  $ZI$  подповерхностной трехслойной среды от частоты

Методы электроразведки работают на частотах до единиц МГц. Георадиолокация расширяет методы электроразведки на малых глубинах в область более высоких частот и позволяет обнаруживать эффекты в этой области. На рисунке 2.7 приведена зависимость фазы входного сопротивления  $\Phi I(\text{град})$  подповерхностной трехслойной среды от частоты (МГц). В полосе от 0,1 до 2 МГц наблюдается скачкообразное изменение фазы на 20 градусов, которое определяется 1 слоем при уменьшении толщины и которое исчезает при изменении толщины 1 слоя. На рисунке 2.8 приведены зависимости волновых сопротивлений слоев от частоты. Видно, что с увеличением потерь ( $\sigma$  – проводимости) слоя его волновое сопротивление падает.

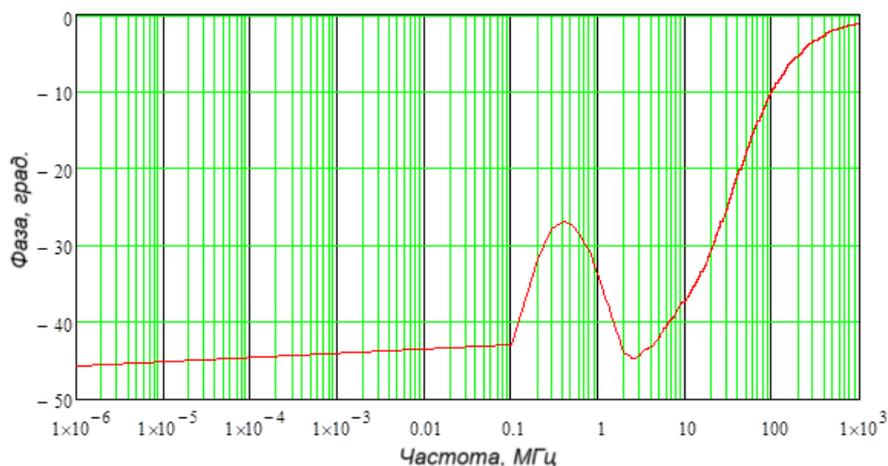


Рисунок 2.7 – Зависимость фазы входного сопротивления  $\Phi 1$  подповерхностной трехслойной среды от частоты

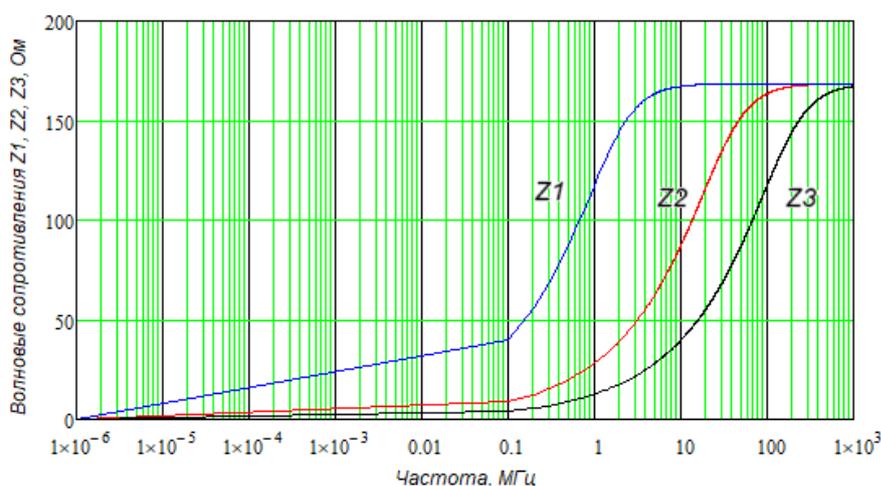


Рисунок 2.8 – Зависимость волновых сопротивлений слоев  $R1, R2, R3$  [Ом] подповерхностной трехслойной среды от частоты [Гц]

На рисунке 2.9 приведены зависимости затухания в слоях от частоты. Видно, что с уменьшением волнового сопротивления слоя потери в нем растут.

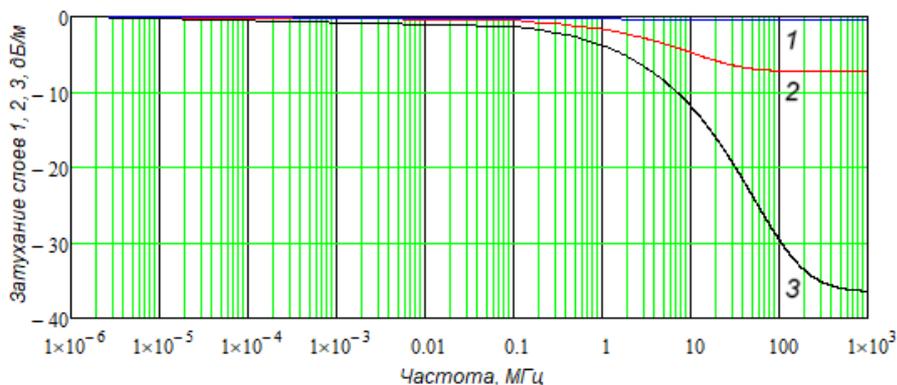


Рисунок 2.9 – Зависимость затухания в слоях  $\alpha 1, \alpha 2, \alpha 3$  [дБ/м] подповерхностной трехслойной среды от частоты [Гц]

Таким образом, одномерные модели неоднородных сред позволяют перейти к методу многополюсников и лучевому методу, что позволяет кроме определения входных сопротивлений различных многослойных дисперсионных сред, рассчитать картины напряженности электромагнитного поля в слоистой дисперсионной среде, распространения электромагнитных импульсов при георадиолокации (спектр частот, затухание, дисперсию). Для этого достаточно задать граничные условия на границах по концам результирующего многополюсника.

### 2.1.3 Двухмерная электродинамическая модель неоднородной среды с потерями

Как было отмечено выше, современное электродинамическое моделирование основано на, получившем широкое распространение, методе конечных разностей во временной области (FDTD). Классическим примером практической реализации данного подхода является программная среда grgMax. Вычислительный алгоритм комплекса строится на конечно-разностной аппроксимации дифференциальной формы уравнений Максвелла (метод FDTD) [214]. Моделирование предполагает разбиение исследуемой области на равномерные пространственно-временные ячейки с фиксацией граничных и начальных условий. При этом топология сетки организована таким образом, что компоненты электрического и магнитного полей пространственно смещены относительно друг друга на половину шага дискретизации (иллюстрация двумерной проекции приведена на рисунке 2.10). Расчетная процедура носит итерационный характер: эволюция электромагнитного поля вычисляется последовательно для каждого временного слоя, опираясь на значения, полученные на предыдущем шаге, вплоть до завершения заданного временного интервала [257]:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow \infty} \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x_i} \quad (2.21)$$

При заданных начальных условиях алгоритм [257] дает эволюционное решение во времени от начала отсчёта с заданным временным шагом.

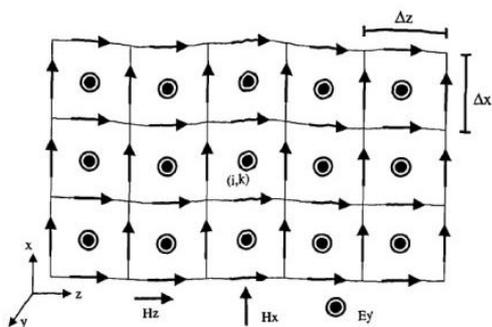


Рисунок 2.10 – Ячейка Yee в двухмерном случае [257]

Вместо непрерывного решения ищется конечное число дискретных значений с определенной точностью. FDTD – итерационный алгоритм. При каждой итерации электрические и магнитные компоненты считаются для каждой ячейки. По умолчанию в программе параметры модели среды считаются не зависящими от частоты, существующая возможность задать дисперсию имеет очень ограниченные возможности и не позволяет учесть энергетические потери георадиолокационного сигнала.

Архитектура grMax базируется на использовании стандартной ортогональной сетки. Ключевыми параметрами дискретизации выступают пространственные ( $\Delta y$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ ) и временные ( $\Delta t$ ) шаги. Существует прямая зависимость между их размерностью и точностью расчетов: уменьшение шага позволяет минимизировать искажения типа «лестничной аппроксимации» на криволинейных границах сред, однако это неизбежно влечет за собой кратный рост времени вычислений.

Математическая взаимосвязь данных величин регламентируется критерием Куранта-Фридриха-Леви (КФЛ) [145]. Суть данного правила заключается в том, что численное решение систем дифференциальных уравнений в частных производных сходится, при выполнении следующего условия устойчивости:

$$v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} < C, \quad (2.22)$$

где  $v$  – максимальная скорость переноса возмущения в среде,  $\Delta x$  – шаг по координате,  $\Delta t$  – шаг по времени,  $C$  – константа, которая в общем случае зависит от уравнения, но не зависит от  $\Delta x$  и  $\Delta t$ . Физически критерий КФЛ означает, что

возмущение за один шаг  $\Delta t$  по времени не должно продвинуться больше, чем на один пространственный шаг  $\Delta x$ .

Наш опыт компьютерного моделирования в программе gprMax показал, что используемая модель плохо учитывает частотную дисперсию электрофизических свойств грунтов в области метровых и сантиметровых волн, эффект поляризации электромагнитной волны при распространении в поглощающих средах. А также, использование в программе gprMax рекурсивного метода расчета FDTD требует больших машинных ресурсов памяти и быстродействия.

С целью разработки более эффективного метода расчёта предложено использовать метод дифференциальных ABCD-матрицы [117, 119, 144, 163].

Для учета поляризации электромагнитной волны предлагается уточненная модель среды, путем введения фиктивных диэлектрической и магнитной проницаемостей. Это позволяет в ABCD-матрице малых элементов среды учесть поляризацию ЭМВ. Для учета омических и диссипативных потерь в широком диапазоне частот предлагается ввести два вида проводимостей – на низких и высоких частотах [144].

### ***Электродинамическое двумерное моделирование методом ABCD-матриц.***

Под элементом пространства будем понимать часть среды, линейные размеры которой малы или стремятся к 0. Электродинамическое моделирование методом ABCD-матриц основано на представлении элементов среды матрицами передачи в виде отрезков электрических цепей с распределенными параметрами. Для этого вводятся комплексные проводимость  $\dot{y}$  и сопротивление  $\dot{z}$  среды:

$$\begin{aligned}\dot{y} &= j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r + \sigma, \\ \dot{z} &= j\omega\mu_0\mu_r\end{aligned}\tag{2.23}$$

где  $\omega = 2\pi \cdot f$  – круговая частота;  $\varepsilon_0, \mu_0, \varepsilon_r, \mu_r$  – абсолютные и относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости;  $\sigma, R_M$  – электрическая проводимость и магнитное «сопротивление» среды, позволяющие учесть тепловые и диссипативные потери, а также потери на гистерезис и вихревые токи.

В этом случае уравнения Максвелла запишутся как [145]:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= \dot{y} \vec{E}; \\ \text{rot} \vec{E} &= -\dot{z} \vec{H}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Пусть плоскость  $YZ$  - граница, разделяющая среду 1 и среду 2, вектор Пойтинга  $\Pi_1$  падающей ЭМВ лежит в плоскости  $XY$ , а вектор  $\vec{E}_1$  ей перпендикулярен так, как это показано на рисунке 2.11а (случай горизонтальной поляризации). В среде 1 будут распространяться две волны: падающая  $\Pi_1$  и отраженная  $\Pi_{10}$ . В среде 2 будет распространяться прошедшая волна  $\Pi_2$ . Тогда  $\dot{E}_1^x = \dot{E}_1^y = 0$ ,  $\dot{H}_1^z = 0$  и из (2.24) следует, что прошедшая ЭМВ будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{E}_2}{\partial y} &= -\dot{z}_2 \dot{H}_2^x, \\ \frac{\partial \dot{E}_2}{\partial x} &= -\dot{z}_2 \dot{H}_2^y \\ \frac{\partial \dot{H}_2^y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{H}_2^x}{\partial y} &= \dot{y}_2 \dot{E}_2. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Прошедшую ЭМВ  $\Pi_2$  можно представить как две ортогональные связанные Т-волны  $\Pi_2^x$  и  $\Pi_2^y$ , где  $\dot{E}_2 = \dot{E}_2^x + \dot{E}_2^y$  (рисунок 2.11б).

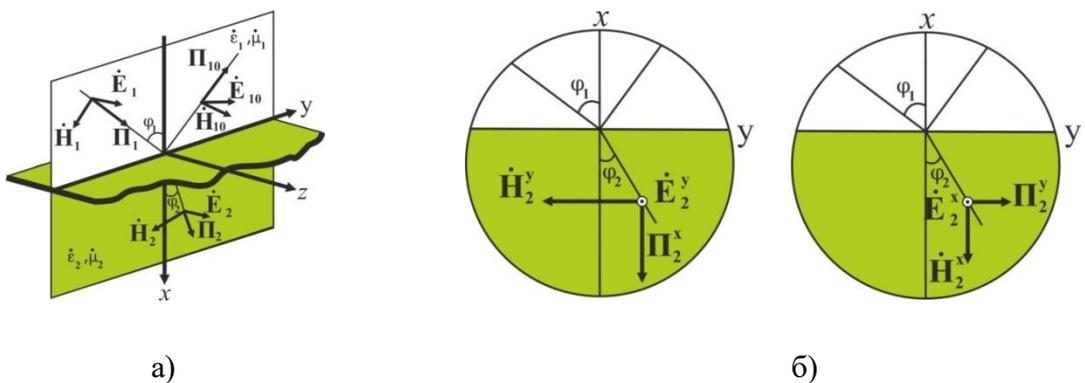


Рисунок 2.11 – Прохождение электромагнитной волны через границу раздела сред: а) падающая  $\Pi_1$ , отраженная  $\Pi_{10}$  и прошедшая  $\Pi_2$  электромагнитные волны; б) две ортогональных связанных Т-волны  $\Pi_2^x$  и  $\Pi_2^y$ , образующие прошедшую волну

Тогда третье уравнение в (2.23) можно разделить на два уравнения, и если ввести фиктивную диэлектрическую проницаемость  $\dot{\epsilon}_m$  и проводимость  $\dot{y}_m = j\omega\epsilon_0\dot{\epsilon}_m$ , которые связывают  $\dot{E}_2^x$  и  $\dot{E}_2^y$ , то (2.25) перепишем как:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \dot{E}_2^y}{\partial y} &= -z_2 \dot{H}_2^x, \\ \frac{\partial \dot{E}_2^x}{\partial x} &= -z_2 \dot{H}_2^y, \\ \frac{\partial \dot{H}_2^y}{\partial x} &= \frac{1}{2}[(y_2 + y_m)\dot{E}_2^x - y_m \dot{E}_2^y], \\ \frac{\partial \dot{H}_2^x}{\partial y} &= \frac{1}{2}[\dot{y}_m \dot{E}_2^x - (y_2 - y_m)\dot{E}_2^y].\end{aligned}\tag{2.26}$$

***Учет поляризационных и диссипативных потерь в среде.***

Введение проводимости  $\sigma$  в (2.1) позволяет учесть только потери пропорциональные мощности волны (тепловые, на отражение и преломление), но не релаксационные. Для учета релаксационных потерь, П.Дебаем была предложена формула:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}\tag{2.27}$$

где  $\epsilon_\infty$  – предельная высокочастотная диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon$  – предельная низкочастотная диэлектрическая проницаемость;  $\omega$  – круговая частота;  $\tau$  – макроскопическое время релаксации.

Внешнее электрическое поле вызывает в ионно-проводящих горных породах (песках, песчаниках, известняках и др.) различного вида поляризационные процессы. Для их учета необходимо знать время релаксации  $\tau$ , которое для большинства пород неизвестно. Но для многих пород известна зависимость проводимости  $\sigma$  и комплексной диэлектрической  $\dot{\epsilon}$  от частоты [178]. Чтобы учесть в породах поляризационные и диссипативные потери введем два вида проводимостей на низких и высоких частотах  $-\sigma, \sigma_\infty$  и два вида диэлектрических проницаемостей  $\epsilon, \epsilon_\infty$  также на низких и высоких частотах, соответственно. Этому соответствует эквивалентная схема замещения. Если представить время релаксации  $\tau$  в соотношении Дебая как:

$$\tau = \rho \varepsilon_0 (\varepsilon - \varepsilon_\infty) \quad (2.28)$$

Тогда полную проводимость горной породы  $\dot{y}$  с учетом релаксационных потерь можно записать как:

$$\dot{y} = i\omega \varepsilon_0 \left( \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega \varepsilon_0 \rho (\varepsilon - \varepsilon_\infty)} \right) + \sigma \quad (2.29)$$

### ***Дифференциальная матрица передачи элемента среды.***

Рассмотрим случай вертикальной поляризации, когда вектор  $E$  лежит в плоскости  $XY$ . Рассуждая аналогично вышесказанному, введя фиктивные магнитную проницаемость  $\dot{\mu}_m$  и сопротивление  $\dot{z}_m = j\omega \mu_0 \dot{\mu}_m$ , переходя аналогично (2.31) к конечным разностям:  $\partial x \rightarrow \Delta x$  и  $\partial y \rightarrow \Delta y$  записываем обобщенную дифференциальную матрицу передачи двумерного элемента среды (ABCD-матрицу):

$$[ABCD] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & (\dot{z}_2 + \dot{z}_m) \cdot \Delta x & -\dot{z}_m \Delta x \\ 0 & 1 & \dot{z}_m \Delta y & (\dot{z}_2 - \dot{z}_m) \Delta y \\ (\dot{y}_2 + \dot{y}_m) \cdot \Delta x & -\dot{y}_m \Delta x & 1 & 0 \\ \dot{y}_m \Delta y & (\dot{y}_2 - \dot{y}_m) \Delta y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_2^x(x + \Delta x) \\ \dot{E}_2^y(y + \Delta y) \\ \dot{H}_2^y(x + \Delta x) \\ \dot{H}_2^x(y + \Delta y) \end{bmatrix} = [ABCD] \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_2^x(x) \\ \dot{E}_2^y(y) \\ \dot{H}_2^y(x) \\ \dot{H}_2^x(y) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

ABCD-матрице (2.31) можно поставить в соответствие эквивалентную схему элемента среды как восьмиполосник (рисунок 2.12).

### ***Расчет электрических полей.***

Дифференциальные ABCD-матрицы элементов среды позволяют записать ABCD-матрицы слоев, а их перемножение – матрицу передачи всего участка среды. Задавая соответствующие граничные условия, можно рассчитать распределение электрических полей в этой среде.

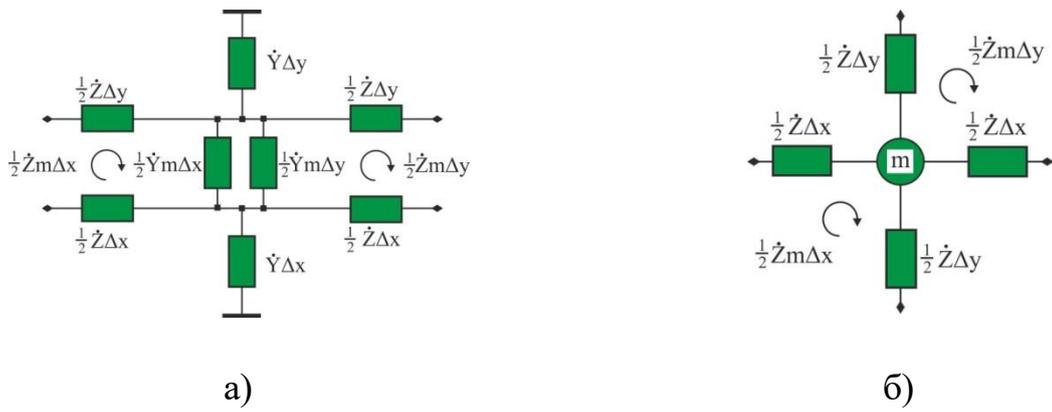


Рисунок 2.12 – Эквивалентная схема элемента среды:  
 а) в виде восьмиполюсника; б) в обобщенном виде

Модель элементов среды позволяет описать двухмерную среду, в общем случае, состоящей из ячеек с разными электрофизическими свойствами. На рисунке 2.13 показана такая модель, в которой двумерная среда представлена матрицей ( $M \times N$ ) элементов и состоящая из вектора внутренних сопротивлений источников ( $Z_1$ ), вектора источников ЭМВ ( $E_s$ ), каскадного соединения восьмиполюсников элементов среды ( $a_s$ , где  $a_{s1}, a_{s2}, \dots, a_{sN}$  – ABCD- матрицы слоев среды) и вектора волновых сопротивлений  $N+1$  среды ( $Z_2$ ).

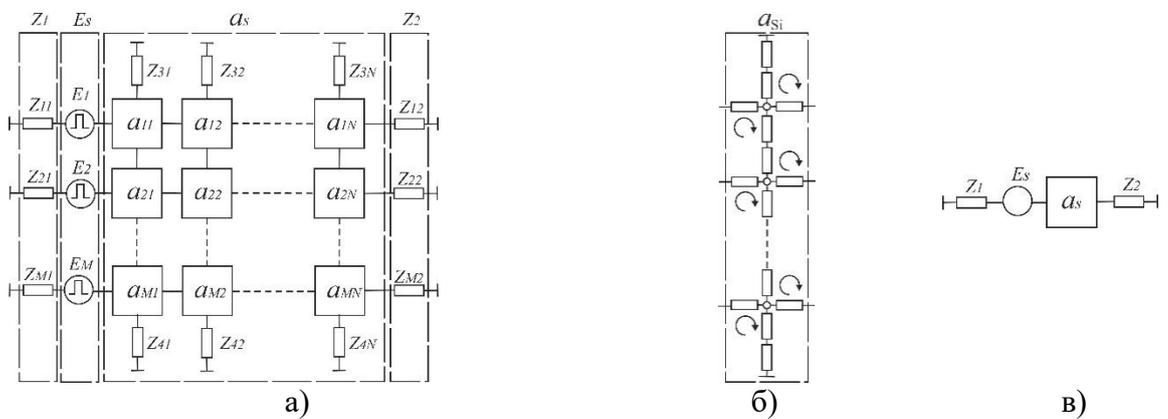


Рисунок 2.13 – Эквивалентные схемы:  
 а) двумерной неоднородной среды; б) результирующего многополюсника  $i$ -го слоя  $a_{si}$ ;  
 в) результирующего многополюсника участка среды  $a_s$

Объединяя элементы послойно, перемножая матрицы слоев, получаем результирующую ABCD-матрицу среды  $a_s$ :

$$a_s = \prod_{i=1}^N a_{si} \quad (2.32)$$

в которой условия распространения Т-волн определяются граничными условиями среды слева и справа:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{E}_s - \dot{Z}_1 \dot{H}_1, \\ \dot{E}_{N+1} &= \dot{Z}_2 \dot{H}_{N+1}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Отсюда, амплитуда магнитного поля справа:

$$\dot{H}_{N+1} = \frac{\dot{E}_s}{a_{11}\dot{Z}_{N+1} + a_{12} + a_{21}\dot{Z}_1\dot{Z}_{N+1} + a_{22}\dot{Z}_1} \quad (2.34)$$

где  $a_{ij}$  – элементы результирующей матрицы  $a_s$ . Остальные амплитуды электрического и магнитного полей справа и слева находим из (2.35).

### ***Устойчивость дифференциальных матриц передачи.***

Рассмотрим для простоты одномерную электродинамическую модель среды. Для нее дифференциальная матрица передачи элемента среды запишется как:

$$[ABCD] = \begin{bmatrix} 1 & -\dot{Z}_2 \cdot \Delta x \\ -\dot{Y}_2 \cdot \Delta x & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Очевидно, что если модуль дискриминанта дифференциальной матрицы (2.30)

$$\det = 1 - \dot{Z}_2 \dot{Y}_2 \Delta x^2 = 1 + \omega^2 \dot{\epsilon}_2 \dot{\mu}_2 \Delta x^2 \quad (2.36)$$

будет больше 1 (т.к.  $Z_2 = j\omega\dot{\mu}_2, Y = j\omega\dot{\epsilon}_2$ ), то значения членов результирующей матрицы  $a_s$  в результате умножения в (2.10) будут стремиться к бесконечности. В работе [147] было показано, что в этом случае решение теряет устойчивость.

Введем параметр  $\delta^2$ , характеризующий отклонение  $\det$  от 1 как

$$1 + |\omega^2 \dot{\epsilon}_2 \dot{\mu}_2 \Delta x^2| = 1 + \delta^2 \quad (2.37)$$

Тогда можно записать условие сходимости процесса для заданного диапазоне частот и  $\delta$  при известном  $\Delta x$ :

$$\left| \omega^2 \dot{\epsilon}_2 \dot{\mu}_2 \Delta x^2 \right| < \delta^2 \quad (2.38)$$

откуда условие устойчивости:

$$\omega_{\max} \frac{\Delta x}{v} < \delta \quad (2.39)$$

где  $v^2 = \frac{1}{\text{Im}(\varepsilon_2 \mu_2)}$  – скорость распространения ЭМВ в среде,  $\omega_{\max}$  – максимальная круговая частота сигнала.

Например, если  $\delta=10^{-3}$ ,  $f_{\max} = 10^9$  Гц,  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с, то пространственный шаг не должен превышать  $\Delta x \leq 0,477 \cdot 10^{-3}$  м.

Разработанная на основе этой теории программа в среде Mathcad [119] моделирует процесс распространения импульса георадара серии «ОКО-2М» с центральной частотой 50 МГц в слоистой дисперсионной среде. При расчетах было учтено, что приемная и передающая антенны разнесены, что порождает кроме отраженной и поверхностную волну.

Ниже представлены рассчитанные георадиолокационные сигналы для трехслойной среды. На рисунке 2.14 представлена модель георадиолокационной трассы для сред лед-песок-монолитные доломиты. На рисунке 2.15 представлен рассчитанный георадиолокационный сигнал многослойной среды лед-песок-разрушенные доломиты.

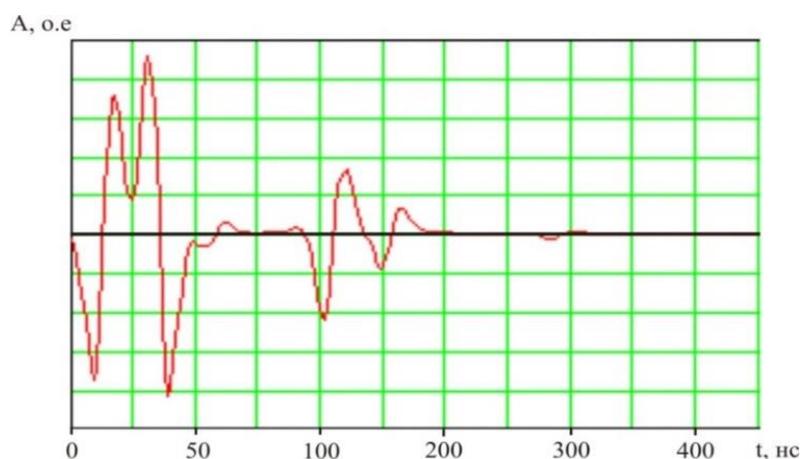


Рисунок 2.14 – Радиолокационный сигнал среды: лед (0,5 м) - песок (5 м) - доломиты

Разрушенные породы моделировались многослойной средой доломиты-песок-доломиты-лед, мощность которых лежала в пределах 0,2-0,4 м. По сигналу видно, что вместо четкой границы песок-разрушенные породы формируется затухающая пачка импульсов. Это вызвано многочисленными переотражениями импульсов в разрушенной породе.

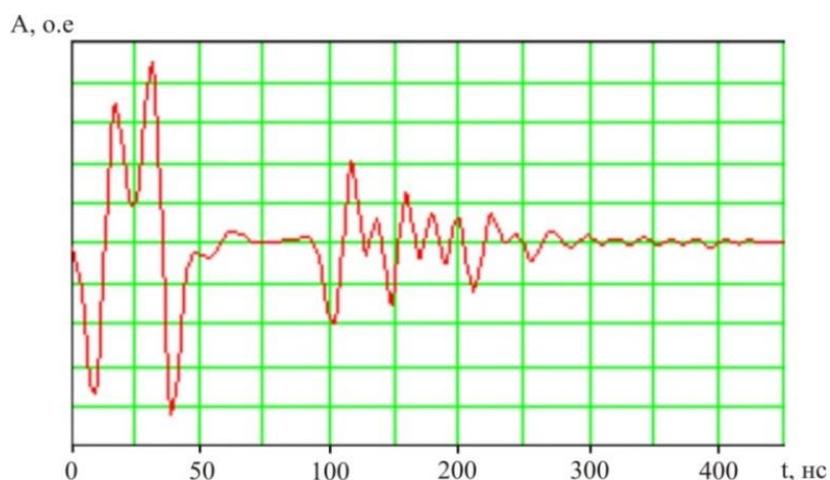


Рисунок 2.15 – Радиолокационный сигнал среды: лед (0,5 м) - мокрый песок (5 м) - разрушенные породы; (валуны 0,2-0,4 м, доломиты в песке со льдом)

Смоделированные георадиолокационные сигналы хорошо согласуются с данными георадиолокационных зондирований, проведенных на россыпных месторождениях [126, 158, 169, 171].

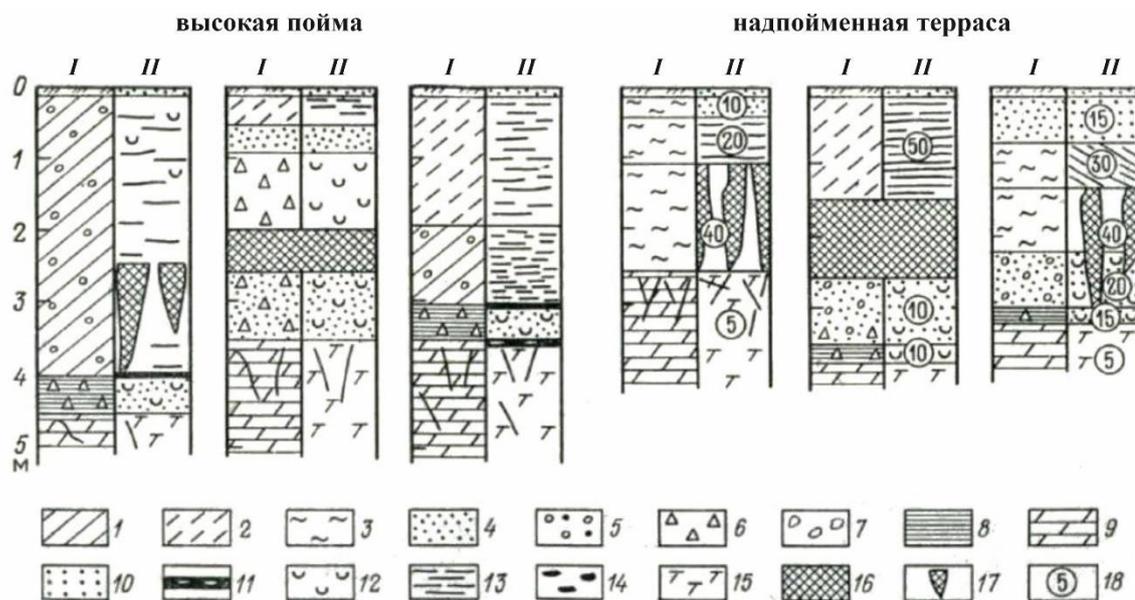
## **2.2. Георадиолокационные модели массивов горных пород россыпных месторождений криолитозоны**

Для построения георадиолокационных моделей проведено численное моделирование георадиолокации геологических разрезов с различными параметрами. Для анализа и обобщения характеристик георадиолокационных волновых полей, выявления особенностей и закономерностей распределения осей синфазности сигналов, изменения их кинематических, динамических параметров, связанных с состоянием, строением зондируемого массива горных пород было проведено моделирование на основе электродинамического моделирования ABCD-матрицами и компьютерного моделирования в системе gprMax методом FDTD (метод конечных разностей во временной области) [145, 253].

### **2.2.1 Георадиолокационные модели мерзлых рыхлых отложений Субарктической зоны Якутии**

В Субарктической зоне Якутии массив горных пород отличается широким распространением сингенетических, сильнольדיстых с поверхности мёрзлых пород, систем повторно-жильных льдов, пластовых льдов. Изменение криогенного

состояния горных пород происходит преимущественно при сезонном протаивании пород. В зависимости от их состава и льдистости глубина протаивания может составлять первые сантиметры – первые десятки сантиметров [205]. На рисунке 2.16 представлены типичные литологические разрезы с указанием криогенных текстур.



**I** — литологический разрез: 1-суглинки, 2-супеси, 3-алевриты, 4-пески, 5-гравийно-галечные отложения, 6- древесно-щебнистые отложения, 7-глибы, 8-доломитовая мука, 9-доломиты трещиноватые;  
**II** — криогенные текстуры: 10-массивная, 11-базальная, 12-корковая, 13-слоистая, 14-линзовидная, 15-пластово-трещинная; 16-крупные линзы и пласты льда, 17-повторно-жильные льды; 18-объемная льдистость, %

Рисунок 2.16 – Типичные криолитологические разрезы Субарктической зоны [24]

Анализ разрезов показывает, что обобщённо их можно представить в виде слоёв дисперсных пород различной льдистости и влажности, с включением пластовых или повторно-жильных льдов, залегающих на многолетнемёрзлых коренных породах (доломитах). Горно-геологические условия россыпных месторождений Субарктической зоны (р. Молодо, р. Эбелях, р. Хара-Мас, р. Маят, р. Биллях, руч. Холомолоох, р. Моргогор) характеризуются следующими параметрами: средняя мощность песков 2 м, торфов – 2,5-3 м (на некоторых участках мощность торфов незначительна, в отдельных случаях достигает 8 м). В массиве горных пород присутствуют подземные льды мощностью от нескольких миллиметров до 7 м, криогенное состояние горных пород продуктивных пластов, как правило, мёрзлое, с возможным наличием таликовых зон. В теплое время года

происходит оттайка в среднем на 0,1-0,3 м (мощность почвенно-растительного слоя) [156, 157].

Компьютерное моделирование для построения синтетических радарограмм проведено в программе grgMax. Для подтверждения аномальных зон радарограмм при моделировании использовалась авторская программа численного моделирования на основе ABCD-матриц [119]

**Модель «Горизонтально-слоистый разрез».** Исходными данными для этой модели послужили результаты геофизических исследований на месторождении р. Маят - «Участок 330». Для заверки геофизических данных пробурена скважина 330-2-2 на профиле №4. По дифрагированным волнам осей синфазности сигналов георадиолокационного профиля №4 рассчитаны диэлектрические проницаемости ( $\epsilon$ ) горных пород, а по составу пород заданы значения [156] удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) для каждого слоя.

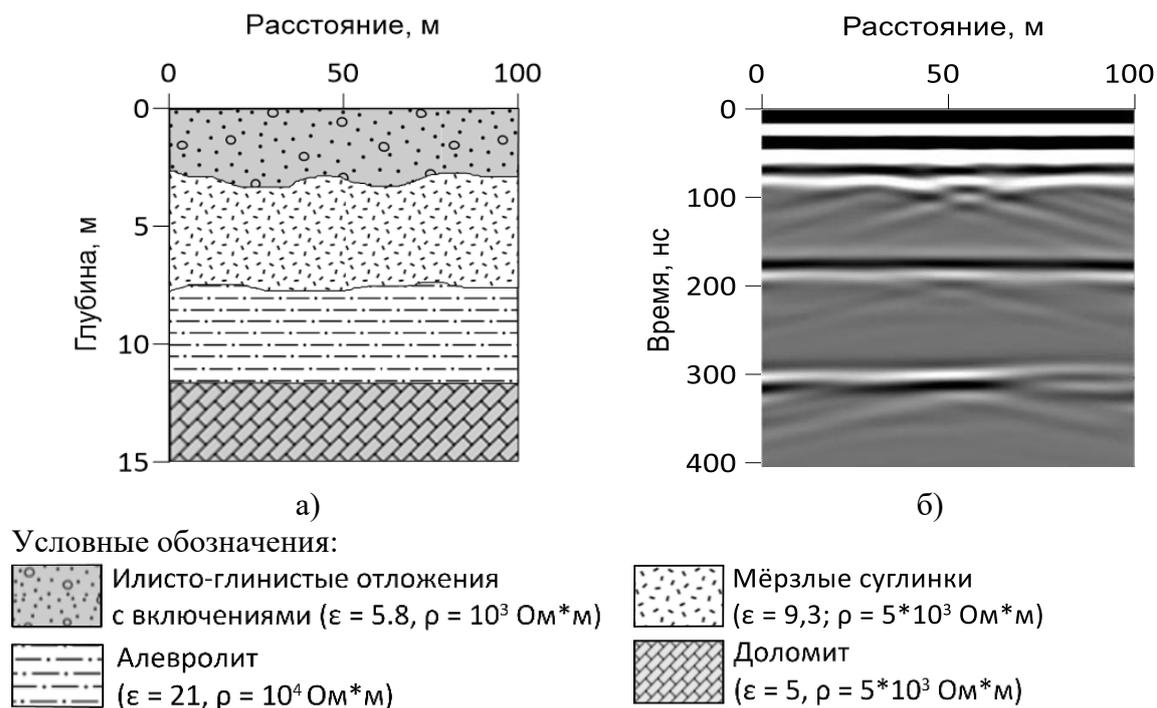


Рисунок 2.17 – Георадиолокационная модель горизонтально-слоистого разреза ММГП россыпного месторождения Субарктической зоны:  
а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

До глубины 3 м вскрыты с 3 м до 8 м, - слабодистые илисто-глинистые отложения ( $\epsilon=5,8, \rho=10^3 \text{ Ом*м}$ ). Ниже, - слой мерзлых суглинок сероватого цвета ( $\epsilon=9,3, \rho=5*10^3 \text{ Ом*м}$ ). От 8 до 12м прослежен слой алевролита темно-серого цвета,

плотного, с субгоризонтальной слоистостью ( $\epsilon=21$ ,  $\rho=10^4$  Ом\*м). Коренные породы - доломит светло-серого цвета, тонкозернистый, плотный, массивный ( $\epsilon=5$ ,  $\rho=5*10^3$  Ом\*м). На основе полученных данных построена геологическая модель (рисунок 2.17а), согласно которой проведено компьютерное моделирование и получена синтетическая радарограмма (рисунок 2.17б) для георадара с центральной частотой 50 МГц.

Горизонтально-слоистая структура массива мерзлых рыхлых отложений отображается на радарограммах протяженными осями синфазности отраженных волн (рисунок 2.17б). В местах криволинейности границ раздела геологических слоев горизонтальная форма осей синфазности искажается в результате образования дифрагированных волн, что соответствует результатам полевых георадиолокационных измерений, представленных на рисунке 2.18.

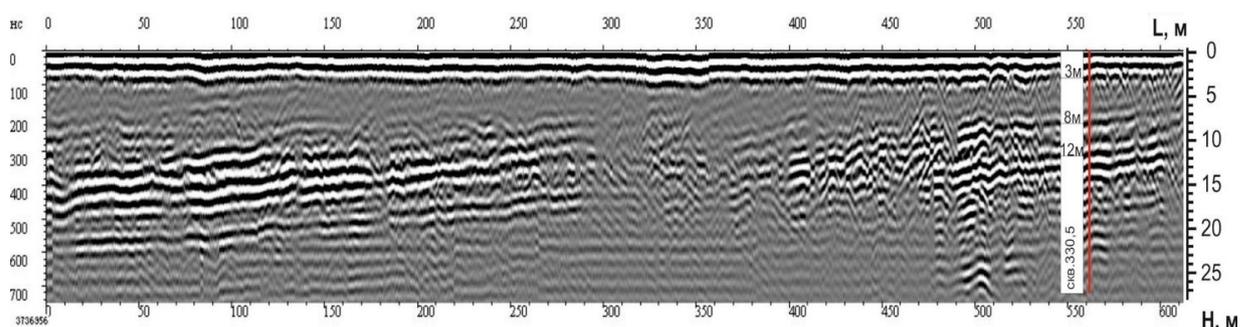


Рисунок 2.18 – Георадиолокационный разрез по профилю 4 участка 330 месторождения «Маят»

На полевой радарограмме (рисунок 2.18) прослеживается граница на глубине порядка 3-5м, интерпретируемая как подошва торфов. Очень хорошо видна неоднородная структура ниже торфов и граница коренных пород на глубине порядка 10-15м. Уверенно прослеживаются контрастные отражения, выделяющиеся более высокоамплитудными значениями по сравнению с соседними участками, на которых оси синфазности прерывисты и низкоамплитудны, вследствие нарушения горных пород.

**Модель «Палеорусло».** По результатам геологической разведки на месторождении р.Маят установлено, что максимальная концентрация полезного ископаемого приурочена к локальным эрозионно-карстовым депрессиям, связанных с палеопотоками. На данных георадиолокации подобные геологические

объекты отображаются как волновые картины, характерные для палеорусел.

На рисунке 2.19а представлена схема геологического разреза палеорусла, состоящего из нарушенных пород и песков, указывающих на специфические условия осадконакопления в части реликтовых водотоков. На основе этой схемы проведено компьютерное моделирование в системе grgMax, результаты которого представлены на рисунке 2.19б в виде синтетической радарограммы.

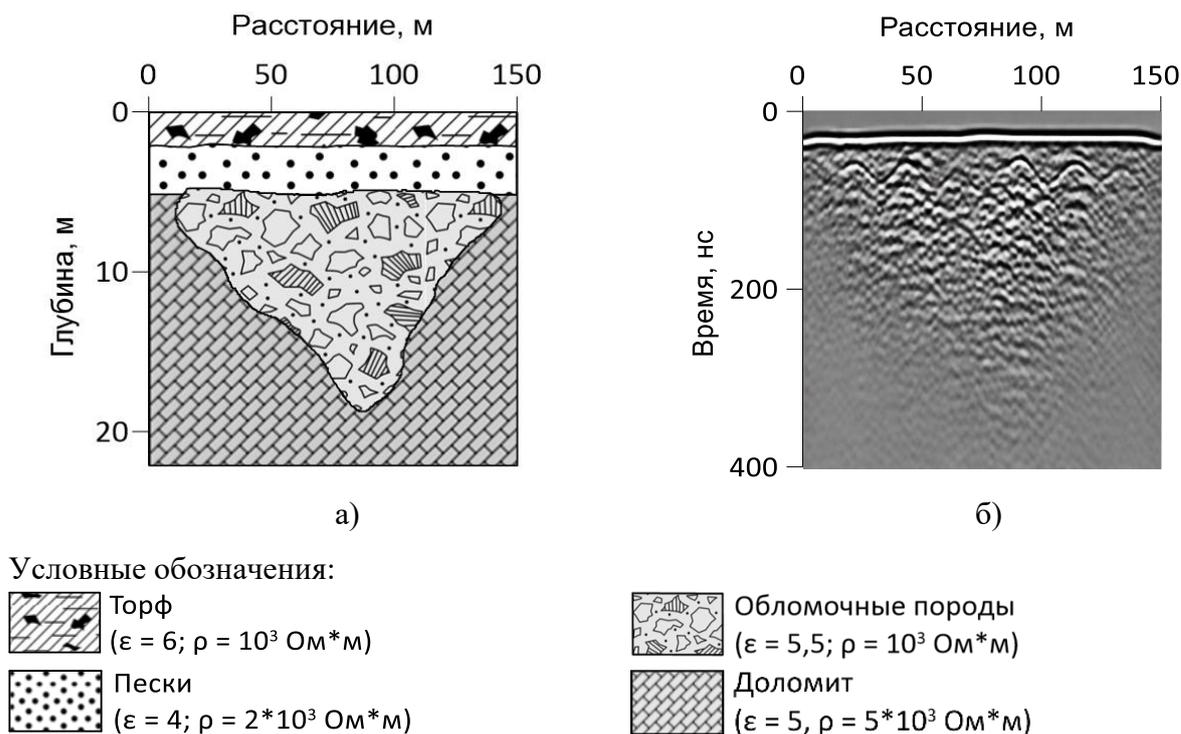


Рисунок 2.19 – Георадиолокационная модель - палеорусло:  
а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

При моделировании использованы параметры для георадара с центральной частотой 100 МГц. Радарограмма модели характеризуется сложной «хаотичной» формой осей синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела слоев аллювия и палеорусла, которые имеют V-образную форму. На основе анализа амплитудных значений сигналов радарограмм георадиолокационного моделирования установлено, что относительно сглаженное изменение дисперсии амплитуд - соответствует слоистой структуре, а хаотично-распределенное изменение дисперсии амплитуд – нарушенной структуре с локальными неоднородностями, такие как палеорусла, западения плотика, валунистость и т.д.

На рисунке 2.20 показан интерпретационный георадиолокационный глубинный разрез участка исследований. Профиль получен по методике непрерывного профилирования по буровой линии 104 участка «Верхняя Кула» прииска «Маят». После предварительной обработки на разрезе выделяется граница осадочных и коренных пород на глубине 5 м. На данном профиле выделяется аномальная зона в пределах 30-160 м, представленная хаотичными сигналами, приуроченными к коренным породам (доломиты) с нарушенной структурой, и связана с соответствующим увеличением отражающих границ.

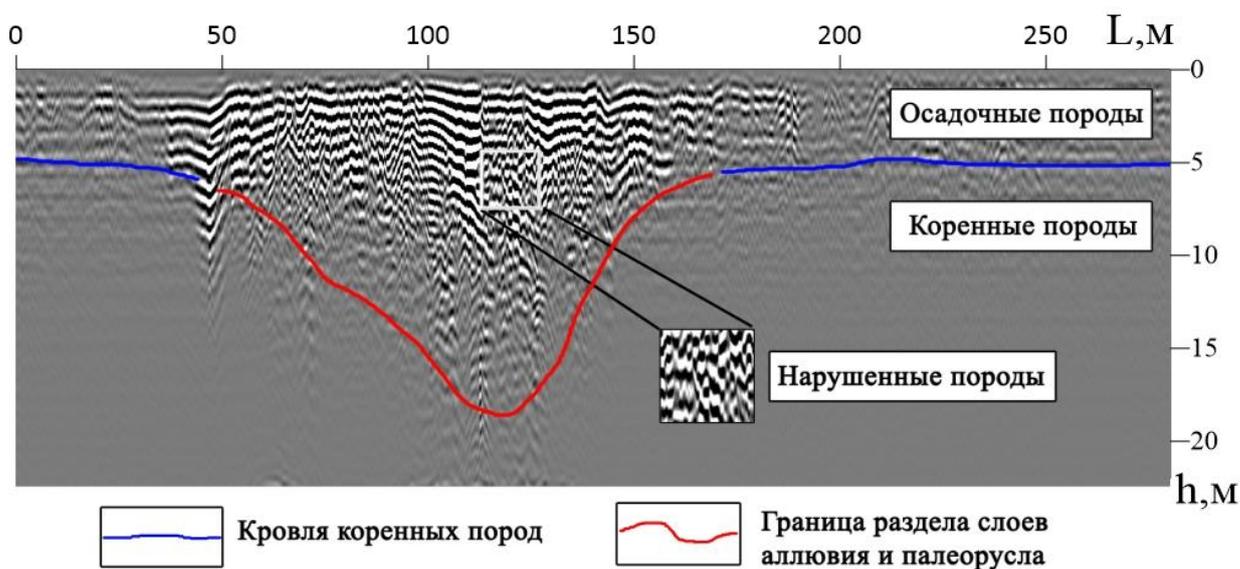
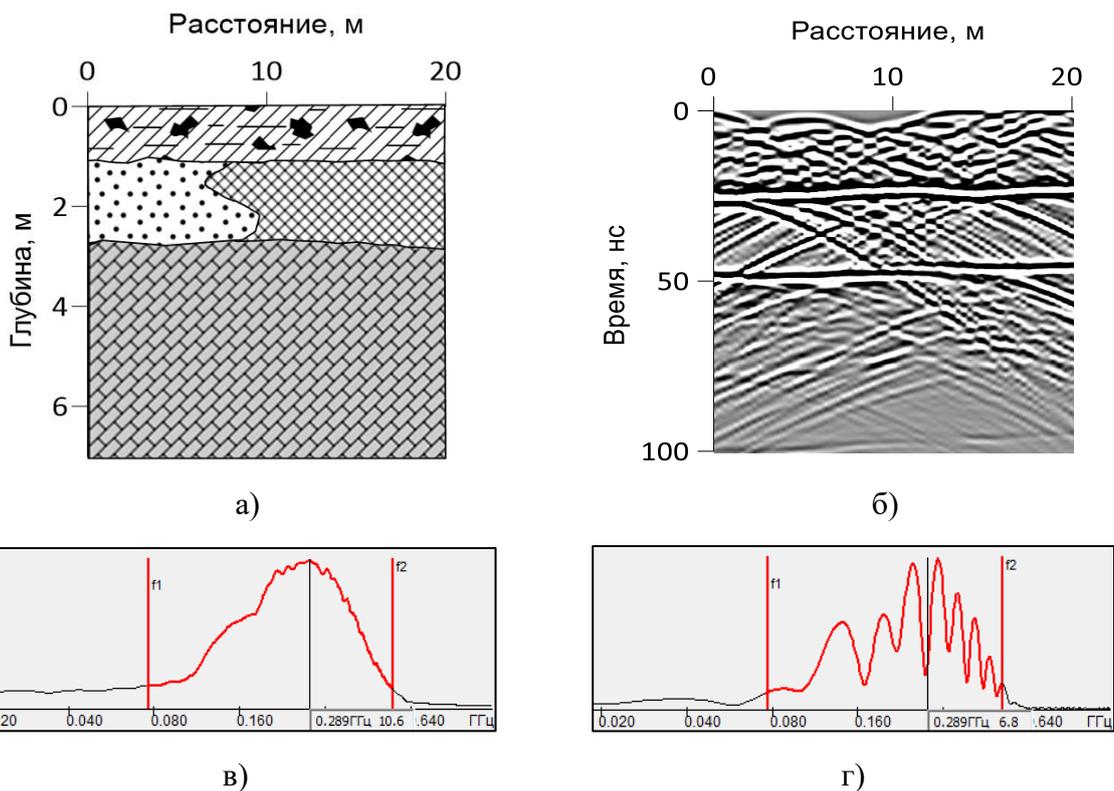


Рисунок 2.20 – Интерпретация георадиолокационного разреза по линии 104

**Модель «Подземный лёд».** На рисунке 2.21а представлена схема геологического разреза с включением подземного пластового льда в массиве горных пород. На рисунке 2.21б представлена синтетическая радарограмма этого разреза, полученная в результате компьютерного моделирования. На радарограмме модели пластового льда наблюдается изменение фазы сигнала отраженного от нижней границы слоя льда по сравнению с сигналом от верхней границы льда, и ниже отражений от границ льда, присутствуют кратно отраженные сигналы.



Условные обозначения:

 Торф ( $\epsilon = 6$ ; $\rho = 10^3 \text{ Ом*м}$ )	 Лёд ( $\epsilon = 3,2$ ; $\rho = 10^5 \text{ Ом*м}$ )
 Пески ( $\epsilon = 4$ ; $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом*м}$ )	 Доломит ( $\epsilon = 5$ ; $\rho = 5 \cdot 10^3 \text{ Ом*м}$ )

Рисунок 2.21 – Георадиолокационная модель подземного пластового льда:  
 а) схема геологического разреза с включением подземного пластового льда;  
 б) синтетическая радарограмма;

Спектральная характеристика: в) в массиве горных пород; г) во льду

График Фурье-спектра трасс, полученный на участке с пластовым льдом, имеет «изрезанную» форму (рисунок 2.21г), в отличие от аналогичного графика с участка без пластового льда, имеющего «гладкую» форму (рисунок 2.21в). Это объясняется тем, что лёд выступает в качестве гребенчатого режекторного фильтра  $k/\Delta t$  (где  $\Delta t$  – время двойного распространения волны в слое льда,  $k=0, 1, 2 \dots$ ). Подобные эффекты описаны в теории распространения электромагнитных волн в слое электрически менее плотного вещества внутри более плотного непоглощающего (в данном случае, лёд внутри слоя горных пород) [177].

На рисунке 2.22 приведены частотные спектры трасс моделирования георадиолокации подземного льда разной толщины. Моделирование проведено с помощью программы численного моделирования на основе ABCD-матриц [145]. Расчеты проведены для зондирующего сигнала со спектром с центральной частотой 400 МГц. Например, при толщине пластового льда  $h=0,25\text{м}$  получен отраженный сигнал со спектром частот с  $k=3$ .

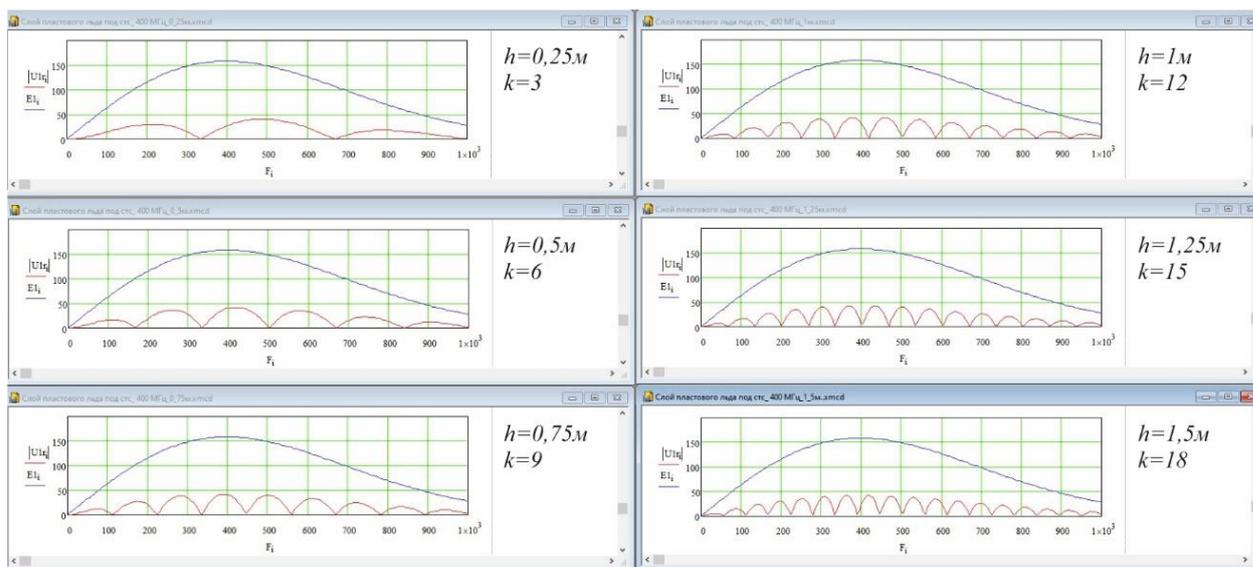


Рисунок 2.22 – Фурье-спектры зондирующего сигнала (—) и георадиолокационных трасс (—) синтетической радарограммы зондирования пластового льда различной толщины

Подтверждение разработанной георадиолокационной модели массива горных пород с включением подземного льда проведена по данным георадиолокационных исследований на буровзрывном блоке прииска «Маят» [159]. Для выполнения измерений использовался георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250 (центральная частота 250 МГц). Георадиолокационные зондирования проведены параллельными профилями по всей площади участка, подготовленного к взрывным работам. На рисунке 2.23 представлены результаты интерпретации данных георадиолокационного профиля, на котором был определен участок с включением пластового льда.

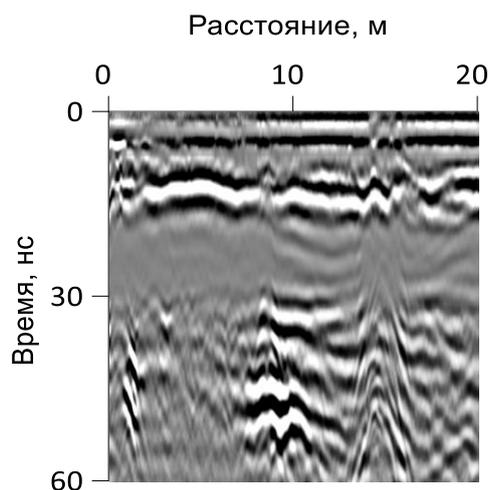


Рисунок 2.23 – Результат экспериментальных георадиолокационных исследований пластового льда на россыпном месторождении р. Маят

Из представленного сегмента радарограммы видно, что слой льда толщиной более 1 метра прослеживается на 8-20 м по профилю, во временном диапазоне 10-30 нс, что соответствует глубине 0,9-2,5 м. Подземный лед залегает в толще песков на коренных породах, и перекрыт торфами. Георадиолокационные сигналы, позволившие его обнаружить, – это отражения от верхней границы льда, которые формируют непрерывную высокоамплитудную ось синфазности [169].

На примере результатов натурального георадиолокационного зондирования пластового льда проведены *исследования изменения динамических характеристик сигналов*. «Динамические характеристики регистрируемых при георадарных исследованиях отраженных волн сложным образом зависят от спектра возбуждаемого сигнала, диэлектрической проницаемости и проводимости среды. При этом сами электрические свойства реальных гетерогенных и многофазных сред являются функциями частоты, и вид этих функций определяется самыми разнообразными факторами: пористостью, литологией, типом флюида, заполняющего поры, водонасыщенностью, температурой и т.д. В этих условиях строгое решение задачи об изменении интенсивности и формы электромагнитных волн в процессе их распространения принципиально невозможно» [17].

При георадиолокационном зондировании высокоомных геологических сред, расположенных в полупроводящей вмещающей породе, контрастной по радиофизическим параметрам к объекту исследований, высокоомная среда

приобретает свойства объемного полуволнового резонатора. В этом случае, на диэлектрических неоднородностях массива, с диаметром,  $D = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_4}}$  соизмеримым с половиной длины электромагнитной волны, из спектра  $\Delta f$  зондирующего сигнала, возникает эффект гармонического резонанса на частоте  $f_0$ , обусловленный сменой фаз электромагнитных колебаний на контрастных границах по электропроводности и отсутствием затухания в неоднородности. Электромагнитные поля с другими соотношениями длин волн, по отношению к пространственным размерам локальных неоднородностей, в реализации эффекта не участвуют, ввиду огибания неоднородностей более длинными волнами и поглощения более коротких волн в электропроводящей вмещающей среде. При этом, из широкого спектра частот зондирующего сигнала выделяются гармонические составляющие на длинах волн, соизмеримых с размерами резонирующего объекта. Пространственное изменение геометрической формы исследуемого объекта отражается на результатах георадиолокационных зондирований в виде миграции спектральных составляющих широкополосного сигнала вдоль профиля исследований.

На рисунке 2.24 представлен временной георадиолокационный разрез зондирования полупроводящей среды, на котором затруднительно выделить искомые границы, а при анализе частотно-спектрального поля сигналов данного разреза (рисунок 2.24б) по резонансному эффекту однозначно определяются диэлектрические неоднородности.

В результате при георадиолокационном зондировании слабопроводящих геологических сред, открываются более широкие методические возможности выявления и прямого измерения геометрических размеров неоднородностей, размеры которых меньше длины волны. Основой точных измерений подобных объектов представляется априорное знание их электрофизических свойств, известных по литературным источникам или измеряемых в натуральных условиях.

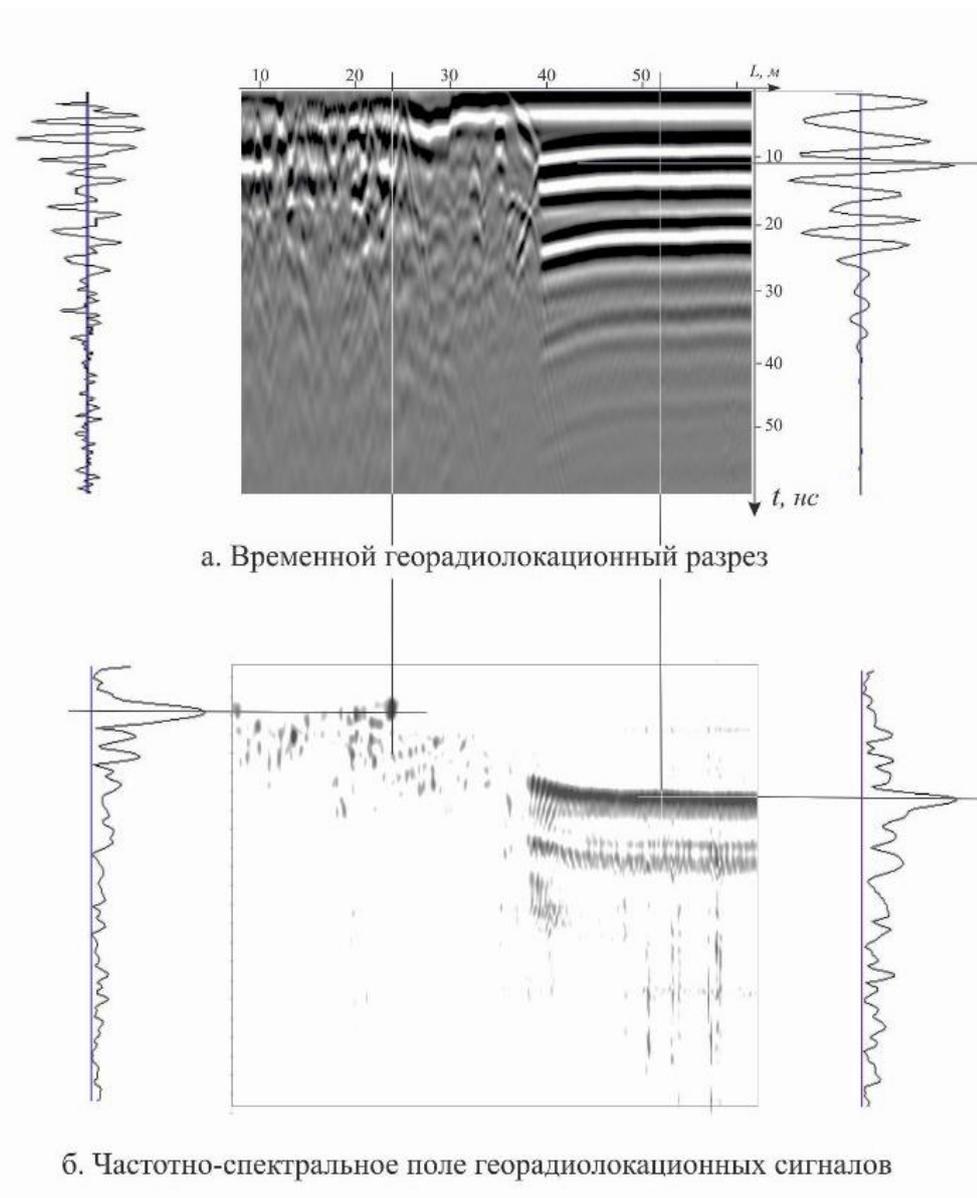


Рисунок 2.24 – Полуволновой резонанс в слое пластового льда

Одним из геокриологических условий, существенно влияющих на эффективность и рациональность освоения месторождений, является включение *повторно-жильных льдов* (ПЖЛ) в массиве горных пород. Например, как показывает практика выполнения взрывных работ, когда скважины располагаются по сетке без учета распределения ПЖЛ на взрывном блоке, результаты взрывов приводят к выходу негабаритов и ухудшению качества дробления пород [156].

ПЖЛ образуются либо после формирования мерзлых пород, и тогда они называются эпигенетическими, либо одновременно с ними – сингенетические. Схема их строения представлена на рисунке 2.25 [31].

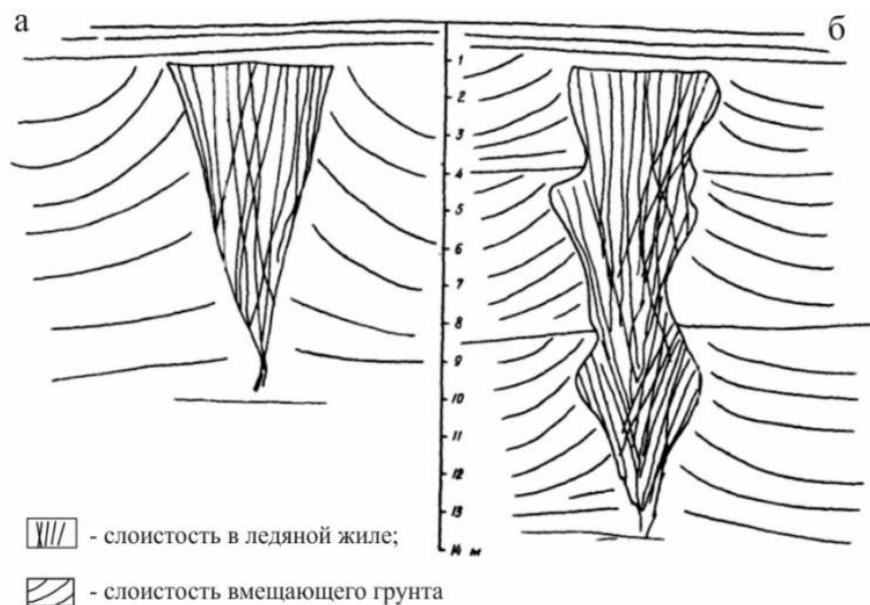


Рисунок 2.25 – Схема строения эпигенетической (а) и сингенетической (б) жил

На рисунке 2.26а представлена схема геологического разреза с включением эпигенетического ПЖЛ в массиве горных пород [12]. На рисунке 2.26б представлена синтетическая радарограмма этого разреза, полученная в результате компьютерного моделирования.

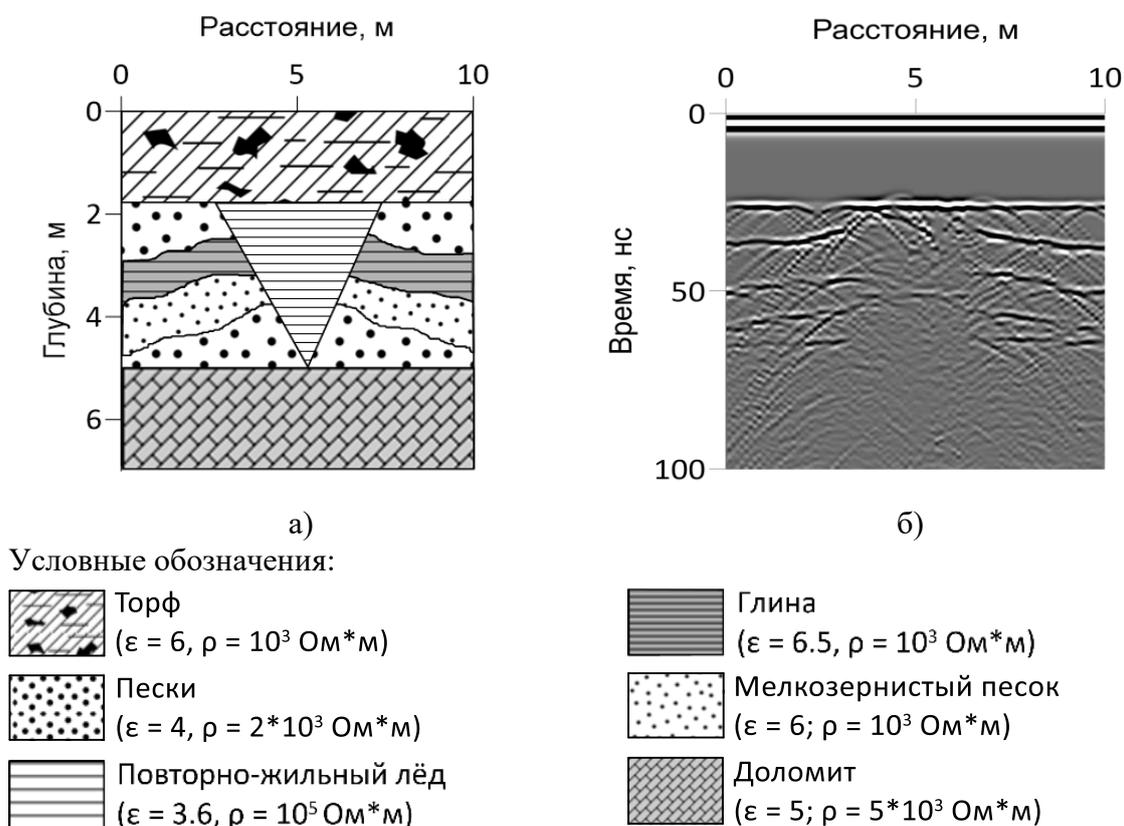


Рисунок 2.26 – Георадиолокационная модель повторно-жильных льдов (ПЖЛ):  
а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

В работе Прудецкого Н.Д. [99] показано, что «модель ПЖЛ представлена георадиолокационным волновым полем, содержащим две гиперболические оси синфазности сигналов, отражённых от верхней и нижней границ ПЖЛ и характеризующееся изрезанной формой Фурье-спектра» [102].

На рисунке 2.27 представлен пример выделения конусовидной ПЖЛ по данным георадиолокации на участке автозимника «Молодо-Джарджан» (Анабарский улус, Якутия). На радарограмме по дифрагированным волнам-гиперболам ПЖЛ обозначены синими контурами. Индикатором конусовидной формы ПЖЛ являются изогнутые вверх оси синфазности сигналов, отраженных от границы слоев вмещающего массива горных пород.

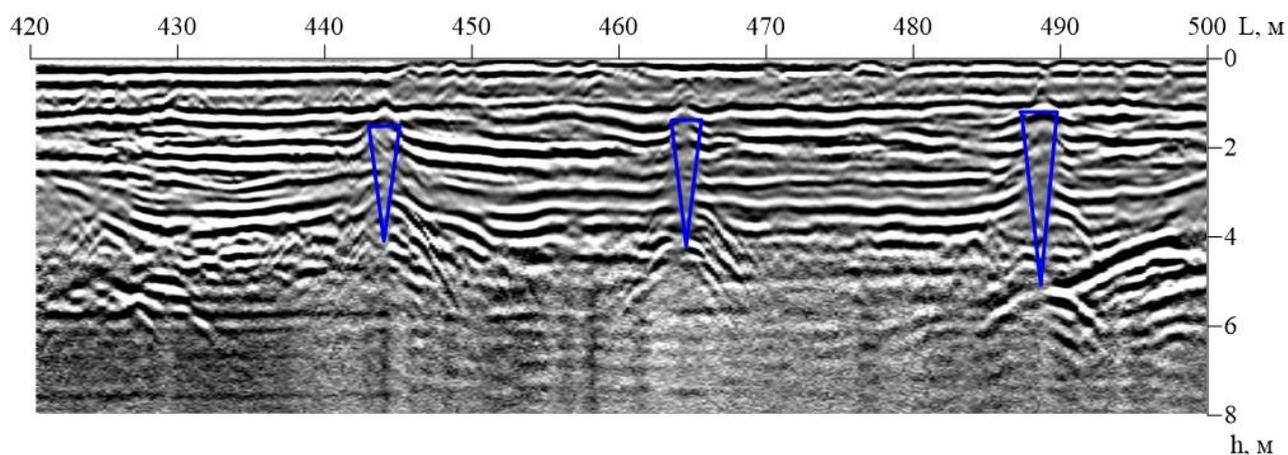


Рисунок 2.27 – Пример радарограммы с выделением ПЖЛ

## 2.2.2 Георадиолокационные модели массива мерзлых горных пород россыпных месторождений Умеренной климатической зоны Якутии

Построение георадиолокационных моделей разреза верхней части массива горных пород россыпных месторождений Умеренной зоны выполнено на основе анализа природно-климатических и горно-геологических условий территории Юго-Восточной и Южной Якутии. Мощность торфов на месторождении р. Аллах-Юнь в Юго-Восточной части Якутии 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 долины р. Большой Куранах в Южной Якутии

представлены серыми песками и валунно-галечными образованиями, мощностью от 4 до 12 м. Погребенные отложения, подстилая современные образования пойменной части и террас, слагают борта долины, поднимаясь над поймой на 10-20 м. Содержание крупнообломочного материала (классом +10 мм) достигает 30% при содержании илесто-глинистой фракции 40-60 % с незначительными включениями (до 2-4%) валунов размером 2-4 м. Геологические условия участка вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии приближены к характеристикам р. Большой Куранах, т.к. они находятся в одном районе. А по данным инженерно-геологического бурения геологическое строение на рассматриваемом участке трассы, в интервале глубин 0-10 м, характеризуется наличием аллювиальных отложений – чередованием слоев песка пылеватого, мелкого и средней крупности, а также галечникового грунта с песчаным заполнителем [98].

В Умеренной зоне, как и в Субарктической [156], предпочтительно применение электромагнитных методов геофизики для оценки строения и геологического состояния массива. По результатам рассмотрения натуральных данных георадиолокации [69], и электроразведки [192], и лабораторных экспериментов, проведенных сотрудниками лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН [156, 169, 175] подготовлена таблица с обобщенными электрофизическими свойствами горных пород Умеренной климатической зоны (таблица 2.3).

Первая рассмотренная модель представляет собой четырехслойную горизонтально-однородную среду рыхлых отложений: почвенно-растительный слой (в том числе торф), пески с гравием, золотосодержащие галечники с щебнем и алевролит. Модель построена по данным георадиолокационных исследований на месторождении россыпного золота руч. Муравьевский. Вторая модель представляет собой четырехслойную среду, характерную для промерзшего дражного котлована месторождения россыпного золота р. Аллах-Юнь: лед, вода, пески, коренные породы. Третья модель также описывает дражный котлован, но в летнее время, и состоит из трех слоев: вода, пески, коренные породы. Эта модель

построена по участку скального выхода, глубокопогребенной россыпи р. Большой Куранах [169]. Четвертая модель – двухслойная среда: почвенно-растительный слой, мерзлые рыхлые отложения с включениями слоя сильно-льדיстых пород. Модель построена по данным комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии [246].

Таблица 2.3 – Обобщенные электрофизические свойства горных пород Умеренной климатической зоны Якутии для компьютерного моделирования

№	Название породы	Мощность (Н), м	У.Э.С. ( $\rho$ ), Ом*м	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon'$
1	Торф (мерзлый)	до 1	$0,6 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$	6-8
2	Песок льдистый (льдистость 50%)	1-3,5	$3 \cdot 10^3 - 39 \cdot 10^3$	3,5-6
3	Песок мерзлый	4-10	$0,6 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^3$	3,5-6
4	Песок талый	1-6	$0,1 \cdot 10^3 - 0,15 \cdot 10^3$	5-12
5	Песок талый водонасыщенный	6-10	$0,1 \cdot 10^2 - 0,4 \cdot 10^2$	12-25
6	Песок с гравием	2-5	$0,4 \cdot 10^3 - 0,5 \cdot 10^3$	8-10
7	Галечник с щебнем	5-8	$1,5 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3$	6-8
8	Алеврит	8-10	$1,5 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^3$	5-7
9	Лед	до 1	$10^5 - 10^6$	3-4
10	Песчано-гравийные галечные отложения	до 5	$4 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^2$	10-13
11	Вода	1-3	60-80	80-85
12	Глинистые сланцы	5-8	$10^3 - 2 \cdot 10^3$	5-7
13	Суглинки	4-8	$10^2 - 2 \cdot 10^2$	23-28
14	Доломит	2-12	$4,5 \cdot 10^3 - 5,5 \cdot 10^3$	4-6
15	Сильнольдистые пески	1-4	$2,5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$	3-5
16	Мелкозернистые пески	1-8	$10^3 - 2 \cdot 10^3$	4-7

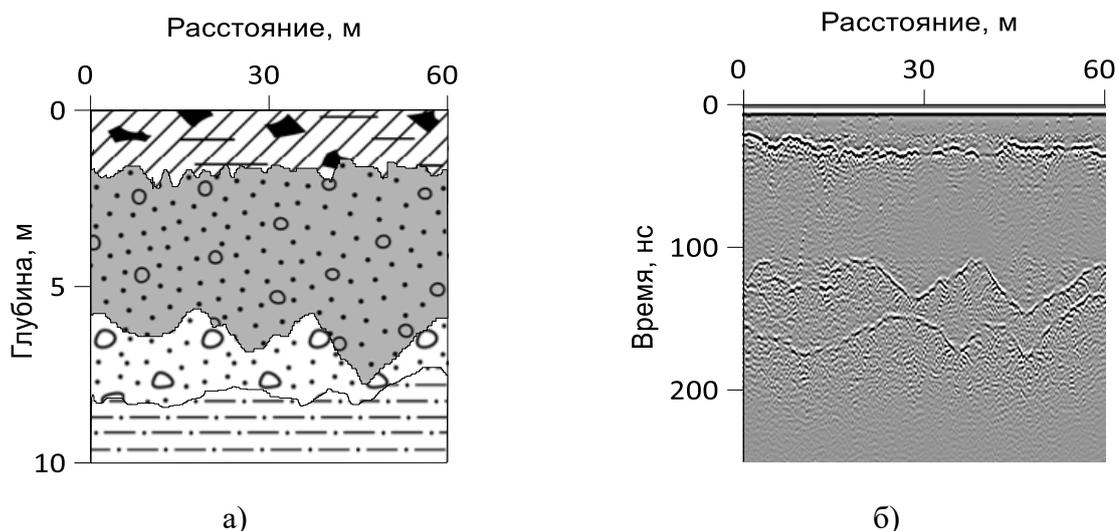
Моделирование георадиолокационных данных выполнено в программной среде grMax с применением метода FDTD (конечных разностей во временной области), широко используемого для решения задач электродинамики. В качестве исходных параметров задавались геометрия исследуемой области, размеры включенных объектов и их электрофизические характеристики (диэлектрическая проницаемость, проводимость), а также свойства вмещающей среды. Результатом моделирования стали детальные георадиолокационные модели, включающие схему геологического разреза с распределением электрофизических свойств и соответствующую синтетическую радарограмму.

### ***Модель «Рыхлые отложения месторождения россыпного золота».***

Первой рассмотрена модель рыхлых отложений месторождения россыпного золота. Слоистая структура массива рыхлых отложений (рисунок 2.28а) отображается на синтетической радарограмме протяженными осями синфазности отраженных волн (рисунок 2.28б). При однородных свойствах горных пород искривление формы осей синфазности связано только с рельефом соответствующих слоев.

Исходными данными для этой модели послужили результаты геофизических исследований на месторождении россыпного золота ручья Муравьевский. Данные георадиолокации при интерпретации опирались на информацию по скважинам с буровой линии Л44.

В опорных точках, около скважин, выполнены параметрические зондирования по методу общей глубинной точки, что позволило рассчитать среднюю скорость электромагнитных волн в перекрывающей толще (торф и почвенно-растительный слой):  $V=0,113$  м/нс, а далее определить значение вещественной части диэлектрической проницаемости –  $\epsilon'=6$ . По составу пород заданы значения УЭС ( $\rho$ ) для каждого слоя. До глубины 2 м прослежен почвенно-растительный слой с торфом ( $\epsilon'=7$ ,  $\rho=5 \cdot 10^2$  Ом\*м). Под ним, с 2 до 5 м - слой песка с гравием ( $\epsilon'=9$ ,  $\rho=5 \cdot 10^2$  Ом\*м). Далее на глубине от 5-8 м - золотосодержащий пласт галечников с щебнем ( $\epsilon'=7$ ,  $\rho=2 \cdot 10^3$  Ом\*м), залегающий на коренных породах - алевролитах ( $\epsilon'=6$ ,  $\rho=2 \cdot 10^3$  Ом\*м). Все породы в разрезе находятся в талом состоянии. На основе полученных данных построен геологический разрез (рисунок 2.28а), согласно которому, проведено компьютерное моделирование и получена синтетическая радарограмма (рисунок 2.28б) для георадара с центральной частотой 250 МГц. Данные компьютерного моделирования и натурные данные георадиолокации имеют схожую волновую картину для границ слоев. Ожидаемо, на натуральных данных больше различных отражений и волн дифракции, связанных с неоднородностью массива горных пород (рисунок 2.29).



Условные обозначения:

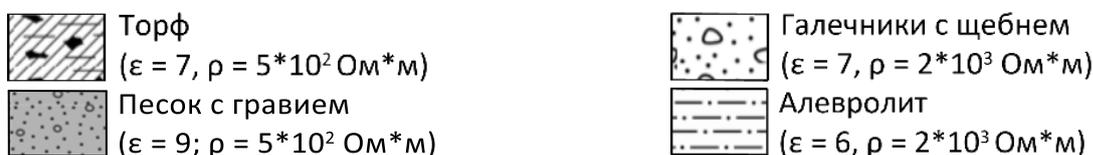


Рисунок 2.28 – Георадиолокационная модель рыхлых отложений месторождения россыпного золота Умеренной зоны: а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

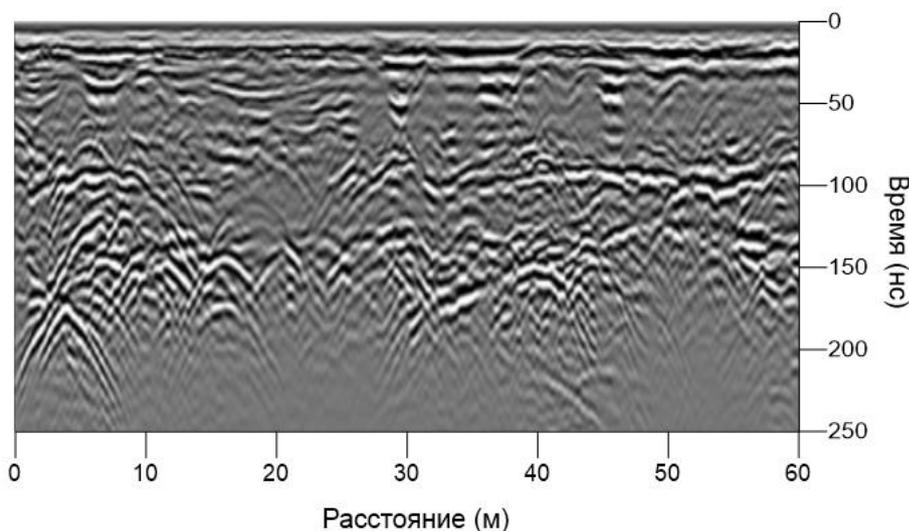


Рисунок 2.29 – Радарограмма с месторождения россыпного золота ручья Муравьевский

### ***Модель «Дражный котлован зимой».***

Вторая георадиолокационная модель построена на основе анализа данных, полученных в зимнее время при изучении дражного котлована, подготовленного в прошедший летний полевой сезон на месторождении россыпного золота, р. Аллах-Юнь. Геологический разрез модели включает: лед мощностью 0,8 м ( $\epsilon' = 3.2, \rho = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), толщу воды мощностью 3 м ( $\epsilon' = 81, \rho = 70 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), золотосодержащие пески,

представленные песчано-гравийно-галечными отложениями ( $\epsilon'=12$ ,  $\rho=5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), которые залегают на коренных породах – глинистые сланцы ( $\epsilon'=6$ ,  $\rho=10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) (рисунок 2.30а).

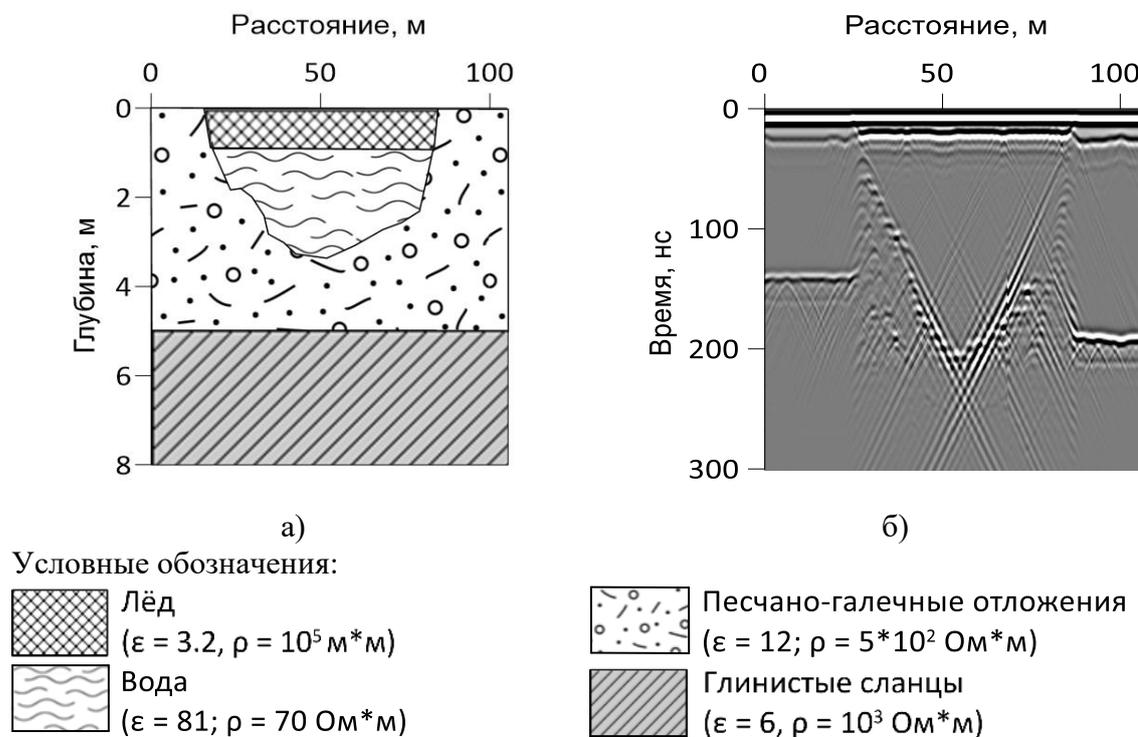


Рисунок 2.30 – Георадиолокационная модель дражного котлована зимой: а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

Моделирование волнового поля выполнено на частоте 250 МГц с базой между передающей и приемной антеннами 0,63 м (георадар «ОКО-2»). На синтетической радарограмме в верхней части разреза прослеживаются оси синфазности зондирующих сигналов (рисунок 2.30б). Чуть ниже на них накладываются высокоамплитудные (контрастные) сигналы, отраженные от границы «лед-вода». От поверхности бортов дражного котлована образовались дифрагированные волны, они пересекаются в центре радарограммы и затрудняют ее интерпретацию в этой части. Регулярность сигналов и достаточная контрастность на общем волновом поле позволяют выполнить достоверную визуализацию границы кровли коренных пород лишь по краям от котлована, в диапазоне 150-200 нс.

На натуральных данных с дражного котлована наблюдается схожая волновая картина, ее особенностью можно назвать кратные отражения от границы «лед-

вода», которые представлены контрастными протяженными осями синфазности (рисунок 2.31). Как и на синтетической радарограмме они маскируют отражения от кровли коренных пород по всей протяженности котлована. Борт и дно котлована отчетливо прослеживаются по волнам дифракции.

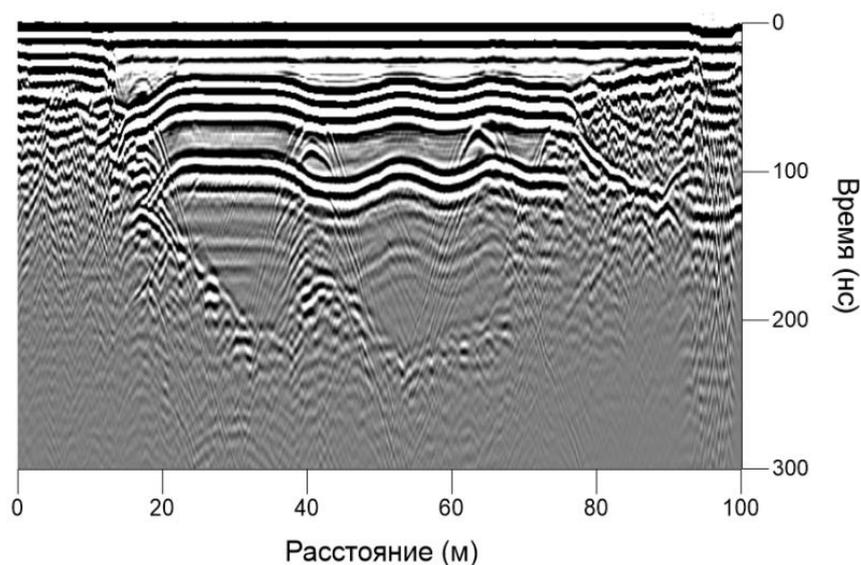
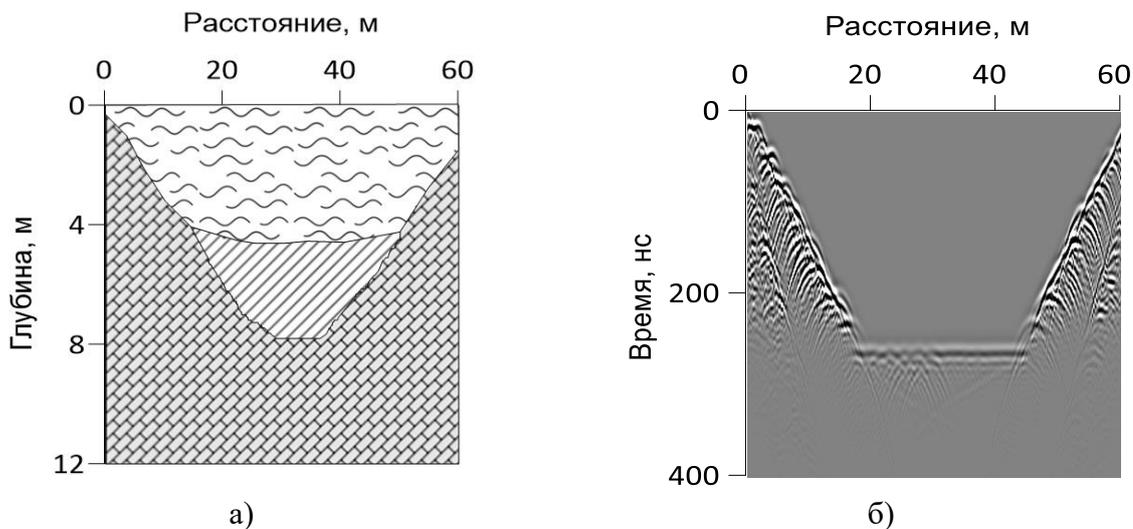


Рисунок 2.31 – Радарограмма с дражного котлована месторождения россыпного золота р. Аллах-Юнь

### ***Модель «Дражный котлован летом».***

Георадиолокационная модель дражного котлована летом построена по данным, полученным в теплое время года, на месторождении р. Большой Куранах (рисунок 2.32а). Волновое поле синтетической радарограммы модели заметно выделяется своей однородностью по сравнению с другими моделями, из-за большого дражного котлована, заполненного водой (рисунок 2.32б). Высокоамплитудные волны дифракции сформировали волновую картину бортов котлована, в которую входят также и переотражения сигналов. Дно котлована прослеживается по осям синфазности, образованным на границе «вода-суглинки». Сигналы на этой границе слабые из-за затухания электромагнитных волн в толще воды, а также от того, что суглинки пропитаны водой и имеют высокое значение вещественной части диэлектрической проницаемости. Выход коренных пород по дну котлована не просматривается на синтетической радарограмме, также как и на натуральных данных (рисунок 2.33). Увеличение затухания электромагнитных волн с

глубиной на натуральных данных заметнее по слабеющим отражениям от бортов котлована.



Условные обозначения:



Рисунок 2.32 – Георадиолокационная модель дренажного котлована летом:  
а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

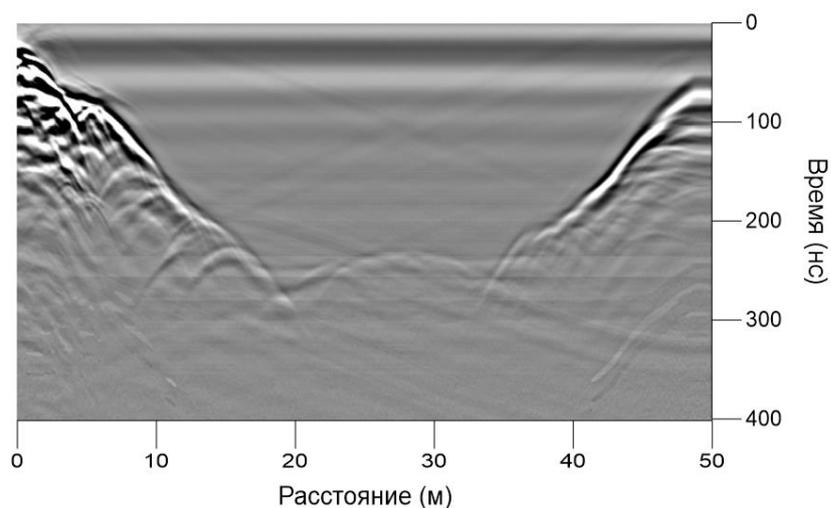
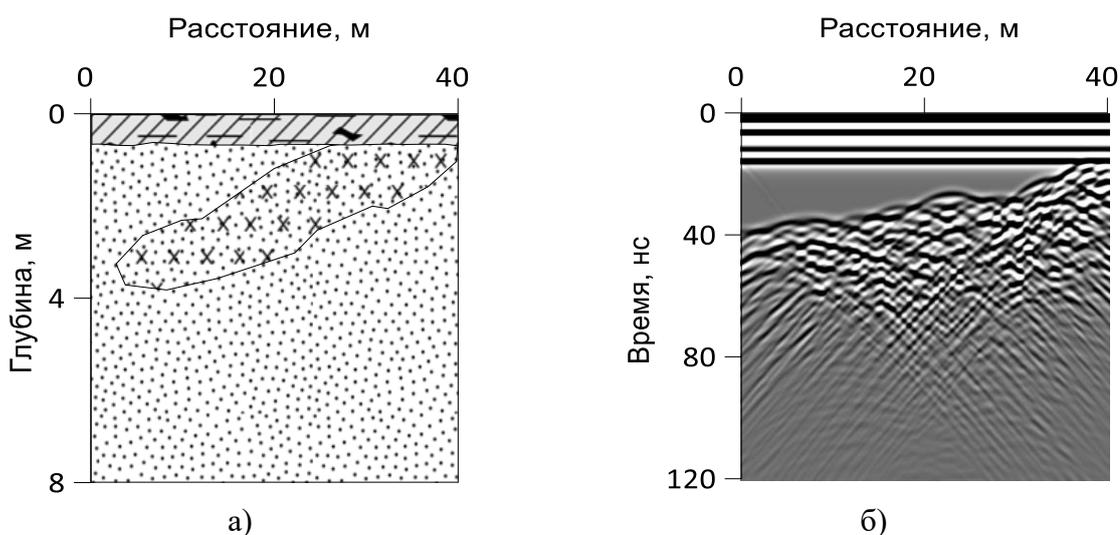


Рисунок 2.33 – Радарограмма с дренажного котлована месторождения россыпного золота р. Большой Курамах

**Модель «Рыхлые отложения с включениями слоя сильно-льדיстых пород».**

Модель мерзлых рыхлых отложений с включениями слоя сильно-льדיстых пород, построена по данным комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии. И хоть она не относится непосредственно к какому-либо месторождению, тем не менее, она описывает встречающиеся в этом районе особые геологические условия (рисунок 2.34а).



Условные обозначения:



Рисунок 2.34 – Георадиолокационная модель рыхлых отложений с включениями слоя сильно-льדיстых пород: а) схема геологического разреза; б) синтетическая радарограмма

Как видно на синтетической радарограмме модели, зондирующий сигнал и слой торфа (включая почвенно-растительный слой) ( $\epsilon'=7, \rho=5 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) образовали чередующуюся последовательность высокоамплитудных осей синфазности, которые не позволяют выявить верхнюю границу мелких и пылеватых песков ( $\epsilon'=6, \rho=10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) (рисунок 2.34б). Они имеют достаточно равномерное по амплитудам волновое поле, а потому на их фоне хорошо прослеживаются сильно-льדיстые пески ( $\epsilon'=4, \rho=3 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), волновое поле которых сформировано большим количеством хаотично распределенных волн дифракции. Нижняя граница этой зоны не имеет четких границ и визуально

определяется по снижению значений амплитуд, максимум которых сосредоточен в вершинах гипербол. Полученная синтетическая радарограмма хорошо описывает реальные данные с участка магистрального трубопровода в Южной Якутии (рисунок 2.35). Можно отметить, что в волновом поле радарограммы натуральных данных кроме волн дифракции в зоне льдистости присутствуют протяженные оси синфазности, вероятно, образованные прожилками льда.

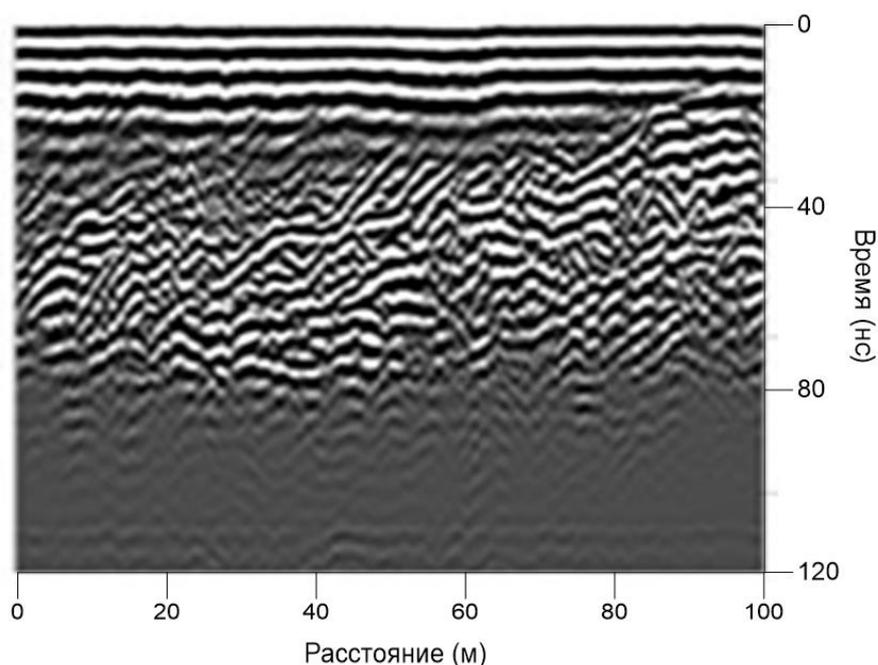


Рисунок 2.35 – Радарограмма с участка магистрального трубопровода в Южной Якутии

Анализ построенных моделей массива горных пород дражного полигона показал, что на результаты георадиолокации существенно влияет наличие водных объектов ввиду замедления скорости распространения электромагнитной волны в воде. Наличие ледяного покрова зимой, также вносит много помех в виде кратных сигналов-переотражений, из-за высокой диэлектрической контрастности границы «лед-вода». Все это затрудняет обработку данных и требует разработки специализированных методик для проведения георадиолокационных измерений и новых подходов при обработке данных, полученных в условиях дражного полигона.

## Выводы к главе 2

Установлены пространственные вариации геофизических свойств горных пород в пределах Субарктической и Умеренной климатических зон Якутии. Анализ геологического строения и характерных значений электрофизических свойств горных пород россыпных месторождений в пределах двух климатических зон Якутии показали перспективность применения георадиолокации при эксплуатационной разведке в криолитозоне.

Электродинамическое моделирование с использованием дифференциальных ABCD-матриц, основанное на представлении малых участков среды в виде матриц передачи, полученных непосредственно из уравнений Максвелла, позволяет использовать методы прямого счета и учитывать все виды потерь, виды границ и типов сред, избежать различные ограничения на используемую математическую модель среды и георадаров, рассчитывать одномерные и двухмерные модели.

Для исследования и обоснования эффективности метода георадиолокации, разработки методики полевых георадиолокационных работ и выбора методов обработки, интерпретации данных разработаны георадиолокационные модели (ГРЛМ) верхней части геологического разреза россыпных месторождений криолитозоны. Данные модели отражают слоистый разрез массивов горных пород россыпных месторождений, содержащие подземные льды и структурные нарушения. ГРЛМ построены для алмазоносных россыпей Субарктической зоны и для золотоносных россыпей Умеренной зоны в условиях их дражной отработки.

На основе анализа ГРЛМ массива горных пород, содержащего пластовый лед, установлен эффект пространственного гармонического резонанса на длинах волн соизмеримых с геометрическими размерами резонирующих диэлектрических объектов.

## **ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ, ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

### **3.1 Обработка данных при оценке строения массивов мерзлых горных пород**

Для аллювиальных россыпей характерна слоистость отложений и их георадиолокационный разрез будет горизонтально-слоистый с возможным нарушением кровли коренных пород, скоплениями валунов, включением подземных льдов и других неоднородностей. Весь спектр горно-геологических задач, решаемых методом георадиолокации, концептуально разделяется на два направления, определяющих стратегию обработки данных:

- структурное картирование, включающее изучение геометрии разреза и прослеживание протяженных литологических границ;
- локализация нарушений горизонтально-слоистого строения массивов горных пород.

«Радиофизические свойства мерзлых рыхлых отложений количественно описываются двумя волновыми характеристиками: кинематические характеристики георадиолокационных сигналов, позволяющие изучать геометрию геологических разрезов и проводить структурный анализ; динамические характеристики георадиолокационных данных позволяют выявлять аномальные зоны распространения электромагнитных волн в исследуемых породах» [18].

#### **3.1.1 Алгоритм обработки данных георадиолокации слоистых сред**

На рисунке 3.1 представлена блок-схема алгоритма обработки данных георадиолокации массива горных пород, имеющего горизонтально-слоистое строение.



Рисунок 3.1 – Алгоритм обработки данных георадиолокации слоистых сред

### ***Первичная обработка георадиолокационных данных.***

*Редактирование данных.* Этап предварительной обработки данных направлен на их подготовку для дальнейшего использования. Несмотря на то, что обычно полевые данные остаются неизменными, они всегда подвергаются проверке. Для этого результаты измерений, представленные в виде радарограмм, выводятся на экран. Используется компактный формат визуализации: горизонтальные точки экрана символизируют отдельные трассы. Такой метод облегчает восприятие большого массива информации и помогает сосредоточиться на ключевых деталях для анализа.

В рамках работы выполняется настройка ключевых параметров:

- Исключаются ненужные или дефектные данные, такие как калибровочные сигналы, поврежденные записи и пропущенные участки, которые возникли из-за сбоев оборудования;
- Для каждой единицы длины профиля определяется оптимальное количество трасс с учетом целей анализа;

- Формат отображения трасс адаптируется таким образом, чтобы обеспечить соответствие заданному масштабу и требованиям к подготовке печатных результатов.

При анализе данных визуально могут быть внесены изменения. Например, данные прореживаются или интерполируются с учетом нового шага профиля, сокращаются временные интервалы для обработки, а также удаляются отдельные трассы или их группы. Помимо этого, полевые записи могут быть разделены на самостоятельные части для отдельной обработки либо объединены в общий массив для работы с ними как с единым объектом [17].

*Коррекция затухания амплитуд.* Амплитудная коррекция выполняется путем изменения коэффициента усиления записи. Этот коэффициент действует как общий множитель, одинаково применяемый к каждому отсчету вдоль временной оси и ко всем трассам в пределах профиля. Такая корректировка улучшает визуальное восприятие волновой структуры, делая её более чёткой и наглядной. Кроме того, уменьшение коэффициента усиления даёт возможность последовательно наблюдать угасание слабых отражений, что помогает оценить их относительную интенсивность.

Для исследований горизонтально-слоистых разрезов проводится коррекция амплитуд сигналов с целью выявления границ отражающих слоев. Коррекция амплитуд также позволяет приводить динамический диапазон записи волнового поля к более равномерному состоянию. Оптимальный коэффициент усиления амплитуд сигналов определяется свойствами геологической среды. При этом используются данные о значениях удельного электросопротивления или информация о свойствах пород из данных скважин (рисунок 3.2). Благодаря коррекции амплитуд отражения от нижележащих слоев выравниваются по амплитуде с сигналами от приповерхностных слоев. Процесс автоматической регулировки усиления (APU) настраивается с использованием таких параметров, как ширина окна для выравнивания амплитуд, степень корректировки внутри этого окна, шаг его перемещения вдоль трассы, а также временной интервал, в пределах которого применяется APU [17].

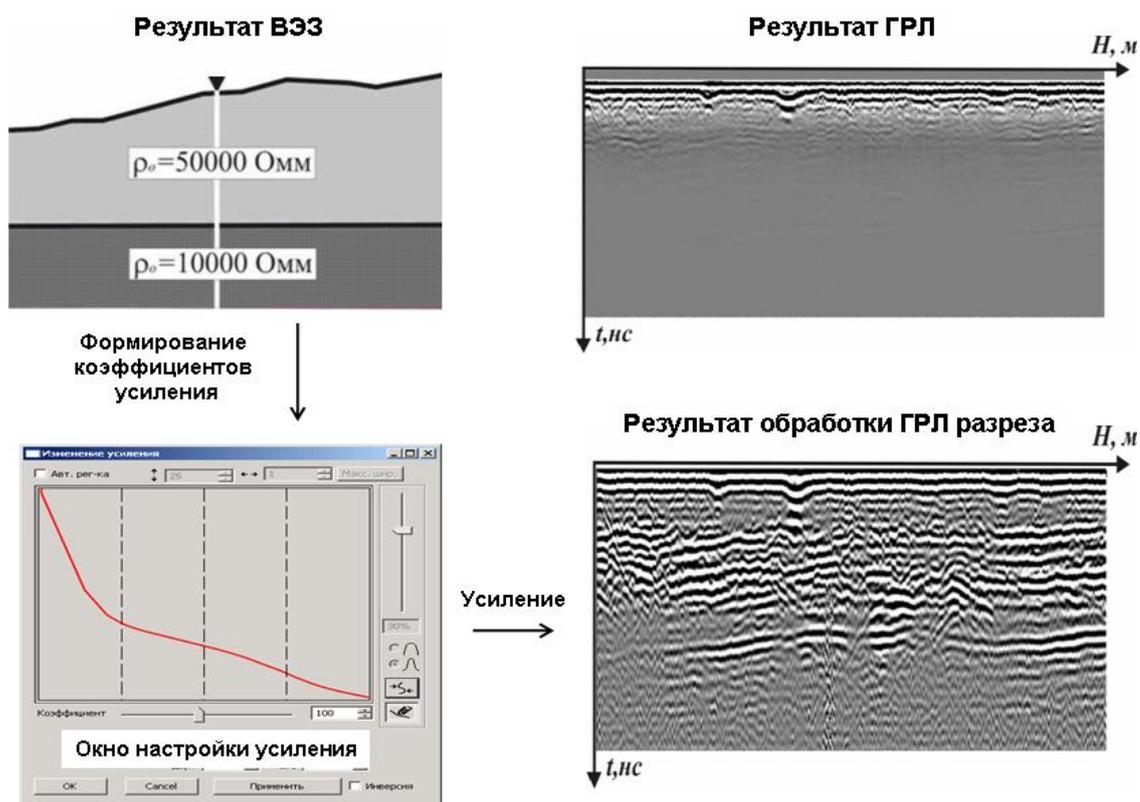


Рисунок 3.2 – Пример регулировки коэффициента усиления по априорным данным

*Подавление помех.* На первичной радарограмме отображается сложная структура волнового поля, включающая различные компоненты: сигналы обратного рассеяния (дифракционные эффекты), прямые и повторные отражения, отражения от воздушной среды, а также различные типы помех. Среди них наиболее часто встречаются следующие:

- Стабильные во времени сигналы с высокой амплитудой, связанные с прямым прохождением воздушных и поверхностных волн между передающей и приемной антеннами;
- Высокочастотные помехи аппаратуры, формирующие постоянный шумовой фон на протяжении всего времени записи.

Для устранения «воздушных» и «поверхностных» сигналов, а также для минимизации влияния аппаратных помех используется метод вычитания среднего значения, рассчитанного по всему профилю, из каждого отсчета.

*Фильтрация.* Этот метод применяется в случаях, когда частотный спектр шума или помех лишь частично совпадает или полностью отличается от диапазона полезного сигнала. В таких ситуациях частотная фильтрация позволяет успешно

подавить нежелательные компоненты, сохраняя при этом амплитуду и форму сигнала практически без изменений. Однако, если спектры помех и полезного сигнала значительно накладываются или совпадают, эффективность фильтрации существенно снижается, что затрудняет выделение осей синфазности и обнаружение полезных волн. Методами фильтрации в частотно–фазовом пространстве добиваются оптимального разрешения сигналов в заданном спектре частот. Устраняются помехи, переотражения, ошибки измерений (выбросы), фазовые искажения, тренд, миграция нуля и т.д. Методами фильтрации в амплитудно-временном пространстве добиваются оптимального соотношения сигналов в энергетической области. Устраняют шумы, выбросы и провалы в измерениях. Убираются амплитудные флюктуации сигналов, выравнивается энергетический фон по отношению к уровню шумов.

*Ввод данных ГНСС.* В ходе измерений изменение местоположения антенного блока георадара определяется ГНСС-приемником, который синхронизирован с программно-аппаратным комплексом георадара. Результатом измерений являются данные георадиолокации и ГНСС-приемника. При первичной обработке, полученной радарограммы вводятся данные ГНСС-приемника, позволяющие осуществить привязку географических координат и высотных отметок к трассам радарограммы. В итоге радарограмма содержит информацию о координатах каждой трассы, об особенностях рельефа дневной поверхности и расстоянии исследуемого участка.

*Анализ радарограмм.* Использование георадиолокации в условиях россыпных месторождений криолитозоны осложняется присутствием слоев горных пород с сильно варьирующимися свойствами. Особенность технологического процесса заключается в том, что полевые геофизические работы по оконтуриванию алмазоносных россыпей проводятся преимущественно летом [168]. В это время формируется сезонно-талый слой, а верхние перекрывающие породы становятся насыщенными влагой, что значительно увеличивает их проводимость. В таких обводненных электропроводящих средах электромагнитные волны претерпевают искажения частотного спектра по мере их

распространения, что снижает глубинную детальность георадиолокационных исследований.

В работе Соколова К.О. [131] разработан метод, направленный на улучшение качества данных о структуре горного массива в условиях повышенной влажности сезонно-талого слоя. Основой подхода является спектрально-пространственный анализ динамических параметров принятого сигнала, который демонстрирует высокую чувствительность к изменению характеристик горных пород. Из-за нестационарности георадиолокационных сигналов, проявляющейся в изменении частотных характеристик с течением времени, для анализа их спектрально-временных особенностей оптимально использовать одномерное непрерывное вейвлет-преобразование (НВП). Этот метод применяет фильтры ограниченной длительности, что позволяет детально отслеживать изменения частотного состава сигнала по его всей длине. В отличие от традиционного Фурье-анализа, НВП обеспечивает более точное и наглядное отображение динамических изменений спектра.

Обработка данных георадиолокации с применением НВП состоит из нескольких ключевых шагов [123]:

- Проведение предварительной обработки для улучшения соотношения сигнал/шум;
- Подбор наиболее подходящего вейвлета и оптимального диапазона его масштабов;
- Уточнение параметров обработки на основе анализа трехмерного вейвлет-спектра в сочетании с результатами бурения;
- Применение вейвлет-преобразования к данным с использованием установленных параметров.

Для повышения эффективности обработки данных георадиолокации мерзлых пород методом вейвлет-анализа был выбран вейвлет «Mexican Hat». Его структура напоминает форму георадиолокационного зондирующего импульса с характерным начальным откликом, который типично возникает при взаимодействии с

высокоомными мерзлыми горными породами. Это делает данный вейвлет оптимальным для анализа подобных сред [76, 174].

После первичной обработки радарограмм и вейвлет-преобразования сигналов, при наличии помех от сезонно-талого слоя, проводится *послойная обработка* радарограммы горизонтально-слоистого разреза.

Послойная обработка радарограмм представляет собой процесс выделения границы слоев зондируемых сред, имеющих различные электрофизические свойства, что позволяет увидеть морфологическое строение участка исследования. В 2004 г. автором была разработана программа «Радар-Лед» для обработки данных георадиолокационного исследования строения ледяного покрова рек [172]. В этой программе реализован алгоритм выделения границ горизонтально-слоистых сред посредством полуавтоматической пикировки (отметки) осей синфазности георадиолокационных сигналов на радарограмме. Данная процедура осуществляется с помощью модуля «Трассировка» (рисунок 3.3). При трассировке используются опции - максимум или минимум, позволяющие автоматически прокладывать линию по высокоамплитудным (максимум) или низкоамплитудным (минимум) осям синфазности отраженных волн. Позднее возможности программы «Радар-Лед» реализованы в программе «GeoScan32», поставляемой в комплекте с георадарами серии «ОКО».

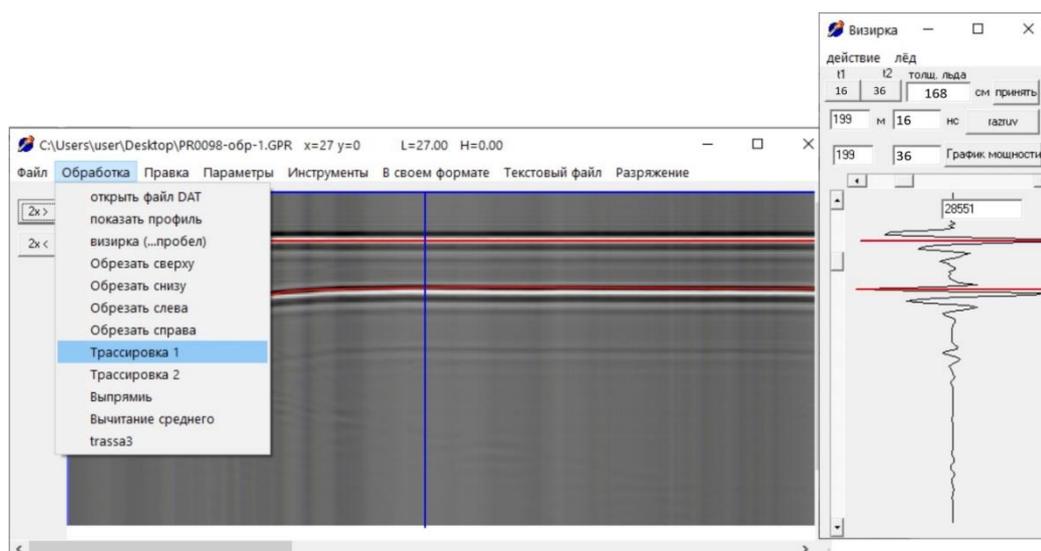


Рисунок 3.3 – Пример трассировки границ слоев геологических сред в программе «Радар-Лед»

На рисунке 3.4а представлен пример работы модуля «Слои на профиле» с выделенными осями синфазности отраженных волн от геологических границ. Для каждого выделенного слоя задаются значения диэлектрической проницаемости. Например, для льда этот показатель составляет 3,2, для песка — 6, для воды — 81, а для горных пород — 9.

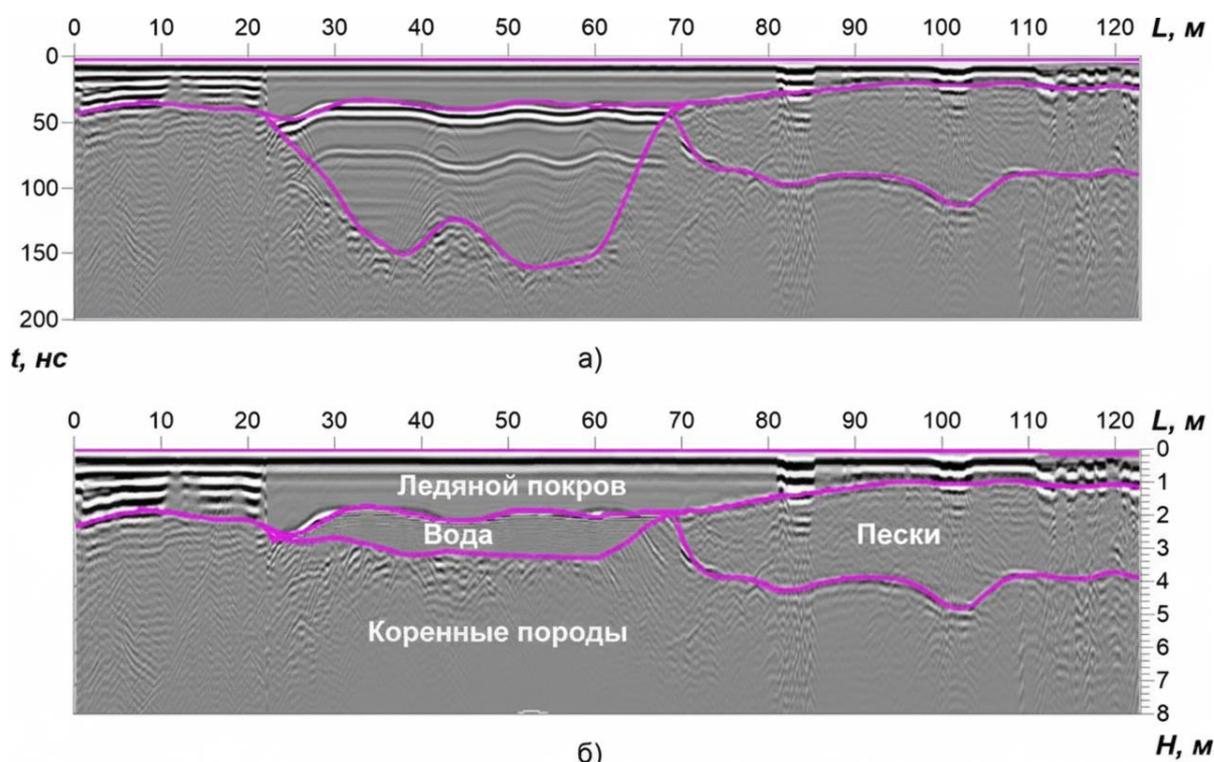


Рисунок 3.4 – Результат послойной обработки радарограммы:  
 а) выделенные оси синфазности отраженных волн от геологических сред,  
 б) интерпретационный разрез по данным георадиолокации

Расчет диэлектрической проницаемости каждого слоя можно проводить сопоставлением времени задержки сигналов, отраженных от границ слоев, с данными бурения или с данными георадиолокационного зондирования по методике ОГТ с разнесением антенн. С учетом значений диэлектрической проницаемости *рассчитывается значения скорости* распространения электромагнитных волн в выделенных слоях, и временная развертка радарограммы *преобразуется в масштаб глубин* (рисунок 3.4б).

*Экспорт результатов обработки.* Результат послойной обработки радарограммы исследуемого участка представляется в виде текстового файла, содержащего информацию о ряде точек измерений, их географические координаты, мощности геологических сред в этих точка. На основе полученной

информации строится геологический разрез участка, на котором оценивается характер залегания и мощность горных пород. Для анализа пространственного распределения мощности геологических сред строится карта при помощи методов интерполяций программ картографирования.

### 3.1.2 Разработка признаков выявления пластового льда по данным георадиолокационных измерений

На основе разработанной георадиолокационной модели (рисунке 3.5), предназначенной для определения характерных для пластового льда в массиве мёрзлых горных пород особенностей радарограмм, была построена модель одиночной георадиолокационной трассы  $s(t)$ , представляющая собой совокупность полезных сигналов  $p(t)$  и помех  $n(t)$ .

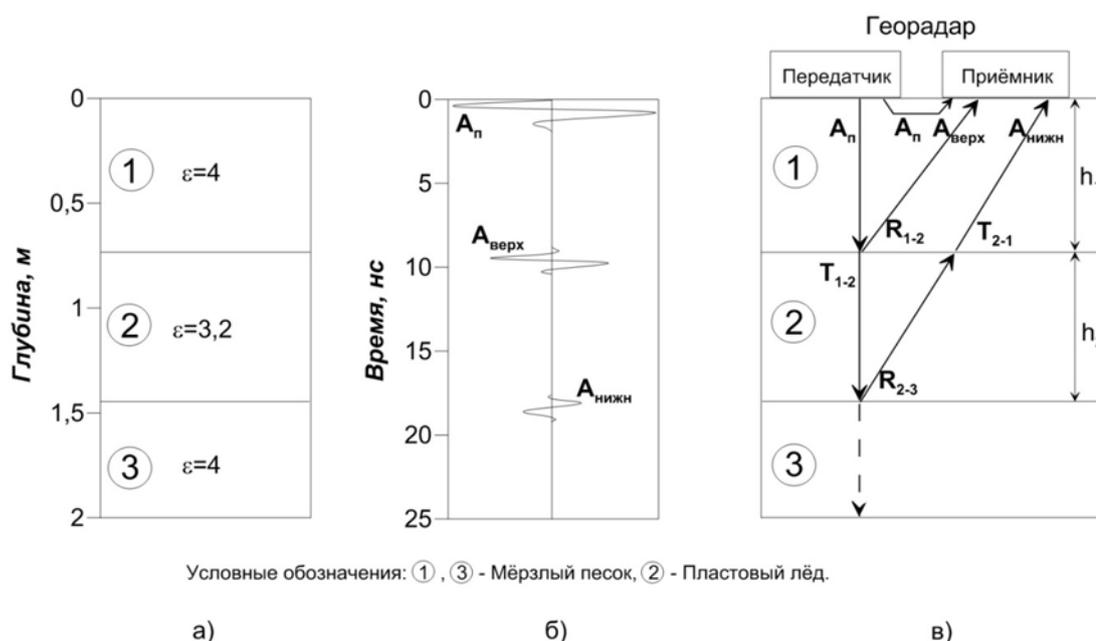


Рисунок 3.5 – Георадиолокационная модель массива мерзлых горных пород с пластовым льдом (а, б) и схема формирования отраженных электромагнитных волн (в)

Компонента  $p(t)$  состоит из суммы сигнала прямого прохождения  $A_n U(t)$  и сигналов от верхней  $A_{\text{верх}} U(t-t_{\text{верх}})$  и нижней  $A_{\text{нижн}} U(t-t_{\text{нижн}})$  границ льда, где  $U(t)$  – функция, описывающая форму георадиолокационного сигнала;  $A_{\text{верх}}$ ,  $A_{\text{нижн}}$  – амплитудные значения сигналов, зависящие от коэффициента отражения  $R$  на верхней и нижней границах льда, а также от поглощения электромагнитной энергии ( $\gamma$ ) в мерзлом песке и льду;  $t_{\text{верх}}$  и  $t_{\text{нижн}}$  – время регистрации сигнала от

верхней и нижней границ льда соответственно,  $t_{\text{верх}} = 2h_1/0,15$ ;  $t_{\text{нижн}} = t_{\text{верх}} + 2h_2/0,168$ .

Предположим, что амплитуда сигнала, излучаемого георадаром, равна  $A_{\text{п}}$ , тогда [176] амплитуда волны, отраженной от верхней границы льда, будет равна:

$$A_{\text{верх}} = A_{\text{п}} \cdot R_{1-2} \cdot e^{-2\gamma_1 h_1}, \quad \text{где} \quad R_{1-2} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2}} = 0,055 \quad - \quad \text{коэффициент}$$

отражения от границы «мерзлый песок – лёд»,  $\gamma_1$  – постоянная распространения, описывающая затухание электромагнитной волны при распространении в мерзлом песке,  $h_1$  – толщина мерзлого песка.

Амплитуда волны, отраженной от нижней границы, будет равна:

$$A_{\text{нижн}} = A_{\text{п}} \cdot T_{1-2} \cdot T_{2-1} \cdot R_{2-3} \cdot e^{-2\gamma_1 h_1} \cdot e^{-2\gamma_2 h_2}, \quad (3.1)$$

где  $T_{1-2}$ ,  $T_{2-1}$  - коэффициенты прохождения на верхней границе льда,  $h_2$  – толщина льда. Коэффициент отражения на нижней границе льда меньше нуля ( $R_{2-3} = -R_{1-2} = -0.055$ ), что приводит к изменению фазы сигнала.

С учетом вышеизложенного, модель георадиолокационной трассы, получаемой при зондировании массива мерзлых горных пород, содержащего пластовый лёд, может быть представлена в виде:

$$s(t) = U(t) + 0,055A_{\text{п}}e^{-2\gamma_1 h_1}U(t - t_1) + (-0,055)A_{\text{п}}e^{-2(\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2)}U(t - t_2) + n(t) \quad (3.2)$$

Величина амплитуды  $A_{\text{п}}$  зондирующего сигнала зависит, как от особенностей аппаратного и программного обеспечения георадара, так и от электрофизических свойств горной породы, на которую установлен георадар, что не позволяет использовать при анализе, обработке и интерпретации данных георадиолокации значения  $A_{\text{верх}}$  и  $A_{\text{нижн}}$ . Однако отношение этих величин не зависит от амплитуды  $A_{\text{п}}$ :

$$\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}} = \frac{A_{\text{п}} \cdot T_{1-2} \cdot T_{2-1} \cdot R_{2-3} \cdot e^{-2\gamma_1 h_1} \cdot e^{-2\gamma_2 h_2}}{A_{\text{п}} \cdot R_{1-2} \cdot e^{-2\gamma_1 h_1}} = (1 - R_{1-2}^2) e^{-2\gamma_2 h_2} \quad (3.3)$$

Для чистого льда удельное затухание  $\gamma_2=0,3$  дБ/м, скорость распространения электромагнитной волны  $V_2=0,168$  м/нс, что позволяет упростить формулу (3.2)

исходя из  $h_2 = \frac{\Delta t V_2}{2}$ :

$$\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}} = (1 - 0.055^2)e^{-2\gamma_2 \frac{\Delta t \cdot V_2}{2}} = 0.99e^{-2 \cdot 0.3 \cdot 0.08 \Delta t} = 0.95^{\Delta t}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta t$  – двойное время прохождения электромагнитной волны в пластовом льду.

По литературным источникам [176, 177] удельное затухание в существующих льдах на частотах около 1 ГГц больше 0,3 дБ/м, следовательно, отношение амплитудных значений сигналов, получаемых в практике георадиолокационных измерений, меньше чем  $0.95^{\Delta t}$ .

При интерпретации георадиолокационных данных удобнее проверять, входит ли в диапазон характерная для льда величина затухания электромагнитных волн  $\gamma_2$ , определяемая, как:

$$20lg\left(\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}}\right) = 20lg(A_{\text{п}} \cdot T_{1-2} \cdot T_{2-1} \cdot R_{2-3} \cdot e^{-2\gamma_1 h_1} \cdot e^{-2\gamma_2 h_2}) - 20lg(A_{\text{п}} \cdot R_{1-2} \cdot e^{-2\gamma_1 h_1}) \quad (3.5)$$

при коэффициентах прохождения:

$$T_{1-2} = 1 + R_{1-2},$$

$$T_{2-1} = 1 - R_{1-2}.$$

Преобразуя выражение (3.5), с учетом, что  $(1 + R_{1-2})(1 - R_{1-2}) = 1 - R_{1-2}^2$ , получим:

$$\begin{aligned} 20lg\left(\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}}\right) &= 20lgA_{\text{п}} + 20lg(1 - R_{1-2}^2) + 20lgR_{2-3} + 20lge^{-2\gamma_1 h_1} + \\ &20lge^{-2\gamma_2 h_2} - 20lgA_{\text{п}} - 20lgR_{1-2} - 20lge^{-2\gamma_1 h_1} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Учитывая, что среды 1 и 3 одинаковые, то после приведения подобных членов в выражении (3.3), получим:

$$20lg\left(\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}}\right) = 20lg(1 - R_{1-2}^2) + 20lge^{-2\gamma_2 h_2} \quad (3.7)$$

Из выражения (3.7), находим удельное затухание:

$$-20lge \cdot (-2\gamma_2 h_2) = 20lg(1 - R_{1-2}^2) - 20lg\left(\frac{A_{\text{нижн}}}{A_{\text{верх}}}\right)$$

$$20lge \cdot 2\gamma_2 h_2 = 20lg\left(\frac{0,99A_{\text{верх}}}{A_{\text{нижн}}}\right)$$

$$2\gamma_2 h_2 = 20lg\left(\frac{0,99A_{\text{верх}}}{A_{\text{нижн}}}\right)/20lge$$

Окончательно получим выражение для удельного затухания в децибелах:

$$\gamma_2 = \frac{20 \lg \left( \frac{0,99 A_{\text{верх}}}{A_{\text{нижн}}} \right)}{17,3 h_2} = \frac{1}{0,16 \Delta t} \ln \left( \frac{0,99 A_{\text{верх}}}{A_{\text{нижн}}} \right), \quad (3.8)$$

где  $h_2$  определяется по формуле  $h_2 = \frac{\Delta t V_2}{2}$ .

В модели георадиолокационной трассы помехи  $n(t)$  представляют собой кратные и дифрагированные сигналы, имеющие такую же форму, как и полезные сигналы. В среднем Фурье-спектр подобных помех совпадает с Фурье-спектром одиночного сигнала, и это не полное соответствие отображается в виде флуктуации огибающей Фурье-спектра всей георадиолокационной трассы. На форму огибающей Фурье-спектра трассы также влияет толщина льда, выраженная в виде двойного времени прохождения электромагнитной волны  $\Delta t$ . В данном случае лёд выступает в качестве гребенчатого режекторного фильтра для частот  $k/\Delta t$  (где  $k = 0, 1, 2, \dots$ ), что приводит к «изрезанной» форме спектра даже в случае отсутствия различных помех.

Таким образом, разработанная модель георадиолокационной трассы имеет следующие признаки: 1) смена фазы сигнала от нижней границы льда, по сравнению с сигналом от верхней границы; 2) отношение  $A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}}$  должно быть меньше  $0,95^{\Delta t}$ ; 3) Фурье-спектр трассы имеет «изрезанную» форму. Для подтверждения наличия указанных признаков в данных георадиолокации проведено компьютерное и физическое моделирование георадиолокационных измерений массива мерзлых горных пород, содержащего пластовый лёд.

*«Компьютерное моделирование распространения сверхширокополосных электромагнитных импульсов в массиве мерзлых пород с пластовым льдом проведено в системе grMax» [214]. «Георадиолокационная модель (рисунок 3.6а) состоит из вмещающей среды, представленной мёрзлым песком (1 м \* 1,3 м) с включением льда толщиной  $h=0,29$  м, длиной  $L=0,5$  м, на глубине  $H=0,5$  м. Электрофизические параметры объектов модели заданы в виде вещественной части относительной комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ), мерзлый песок –  $\epsilon'=4$ , лёд –  $\epsilon'=3,2$ . Моделирование проведено для георадара с центральной частотой  $f_{\text{ц}}=1200$  МГц. Полученная в результате моделирования синтетическая радарограмма представлена на рисунке 3.6б» [39].*

На георадиолокационных трассах с 10 по 30-ю точек зондирования наблюдается изменение фазы сигнала, отраженного от нижней границы (лёд - мерзлый песок), по сравнению с сигналом от верхней границы льда, что соответствует отрицательному коэффициенту у третьего слагаемого в формуле 3.2 и на радарограмме отображается изменением окраски с черно-бело-черной на бело-черно-белую (рисунок 3.6б). Отношение амплитуд сигналов, отраженных от нижней и верхней границ, рассчитано для трассы, полученной в 20-й точке зондирования (рисунок 3.6в)  $A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}}=68/84=0,8$ . Проверим выполнение условия  $A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}} < 0,95^{\Delta t}$ :  $\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}} = 10,15 - 6,7 = 3,45$  нс и, соответственно,  $0,95^{3,45} = 0,84 > A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}}$ .

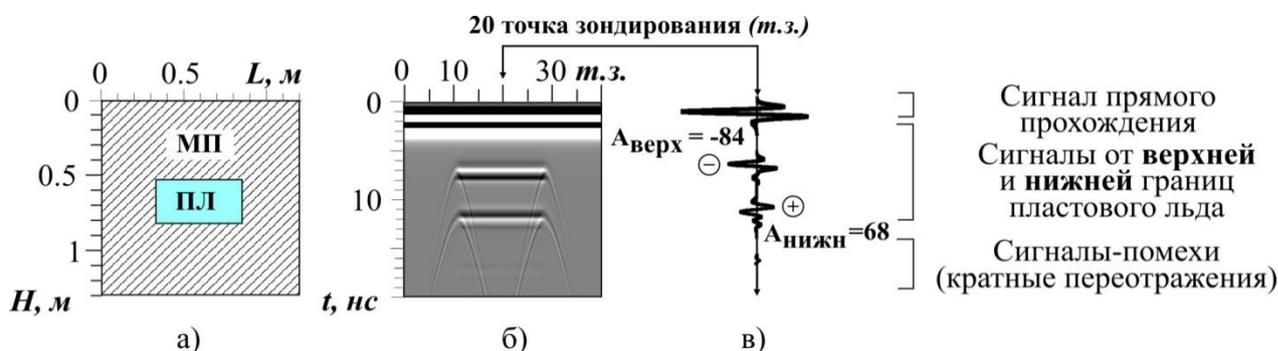


Рисунок 3.6 – Георадиолокационная модель пластового льда  $h=0.29$  м для АБ-1200:

- а) модель массива мёрзлых пород (МП) с включением пластового льда (ПЛ);  
 б) радарограмма; в) георадиолокационная трасса

На рисунке 3.7 представлены Фурье-спектры трасс, полученных на участках с пластовым льдом (рисунок 3.7а) и без него (рисунок 3.7б). «Изрезанная» форма первого спектра объясняется тем, что лёд выступает в качестве гребенчатого режекторного фильтра  $k/\Delta t$  (где  $k=0, 1, 2 \dots$ ) для частот, кратных 290 МГц. Так как диапазон частот в спектре равен 2500 МГц, то  $N=2500/290 \approx 9$ . При отсутствии полезных сигналов (37 т.з.) на Фурье-спектре георадиолокационной трассы наблюдаются низкоамплитудные значения с 1 максимумом.

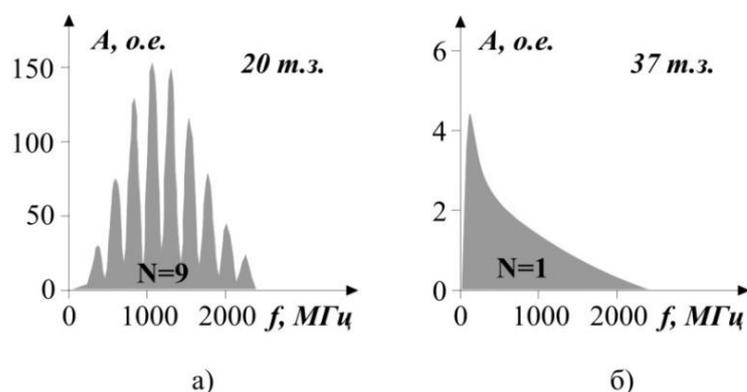


Рисунок 3.7 – Фурье-спектры георадиолокационных трасс радарограммы  
 а) участок с пластовым льдом; б) участок без льда

Для определения наличия на радарограмме волновых полей характерных для пластового льда производится обработка по следующему алгоритму:

1. Выделить непрерывные субгоризонтальные оси синфазности сигналов, находящиеся одна под другой;
2. Выбрать пары осей синфазности, у которых противоположны фазы сигналов;
3. Для каждой георадиолокационной трассы радарограммы:
  - произвести быстрое преобразование Фурье;
  - рассчитать модуль результата п.1 для получения Фурье-спектра;
  - подсчитать количество локальных максимумов Фурье-спектра в рабочем диапазоне частот.
4. Построить график количества локальных максимумов для всех трасс;
5. На графике выбрать участки с высокими значениями, состоящие из трёх и более точек;
6. Для трасс, входящих в выбранные участки и оси синфазности:
  - определить амплитудные значения сигналов от нижней и верхней осей синфазности и рассчитать их отношение;
  - вычислить  $\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}}$ ;
  - проверить  $A_{\text{нижн}} / A_{\text{верх}} < 0,95^{\Delta t}$ .
7. Если существуют оси синфазности для которых выполняются условия из п. 2, 5, 6. то отметить данную георадарную фацию, как пластовый лёд;

8. Произвести перерасчет времени задержки сигналов ( $t$ ) в значения глубины ( $h$ );

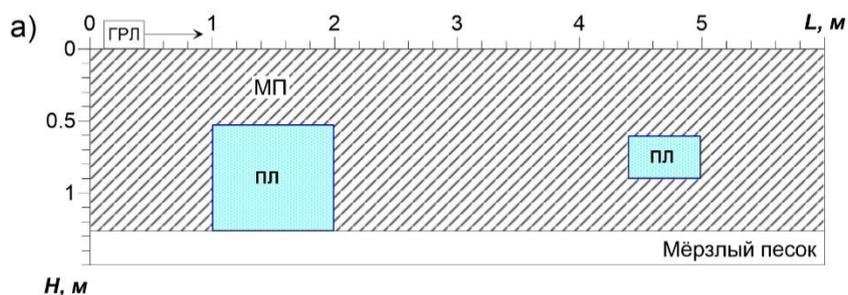
9. Вывод результатов обработки, отражающих пространственное местоположение выявленных пластовых льдов, в виде  $h_{\text{верх}}/h_{\text{нижн}}$ , где  $h_{\text{верх}}$ ,  $h_{\text{нижн}}$  – глубина залегания верхней и нижней границ льда, соответственно, рассчитываемые по формулам  $h_{\text{верх}} = 0,15t_{\text{верх}}/2$ ;  $h_{\text{нижн}} = h_{\text{верх}} + 0,168\Delta t/2$ ;

Для определения возможности выявления подземного льда по «изрезанности» Фурье-спектра проведено физическое моделирование георадиолокации массива горных пород с включением пластовых льдов. Данные модели были сформированы из речного льда в виде двух объектов: размеры первого пластового льда составили 1 м \* 0,4 м \* 0,73 м (рисунок 3.8а), а второго — 0,6 м \* 0,4 м \* 0,29 м (рисунок 3.8б).

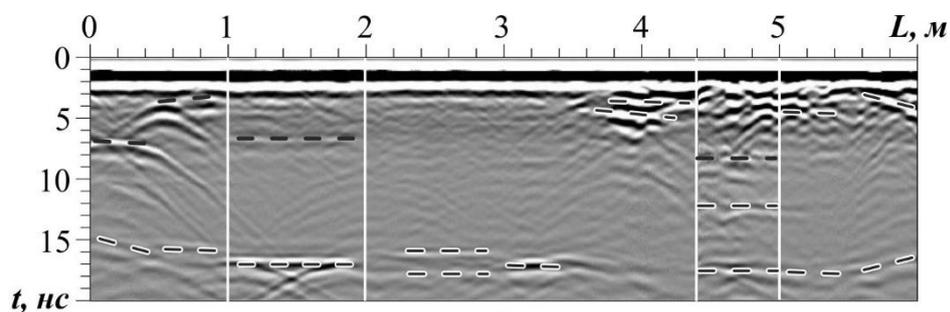


Рисунок 3.8 – Модели пластового льда:  
размеры а) 1 м\*0,4 м\*0,73 м, б) 0,6 м\*0,4 м\*0,29 м

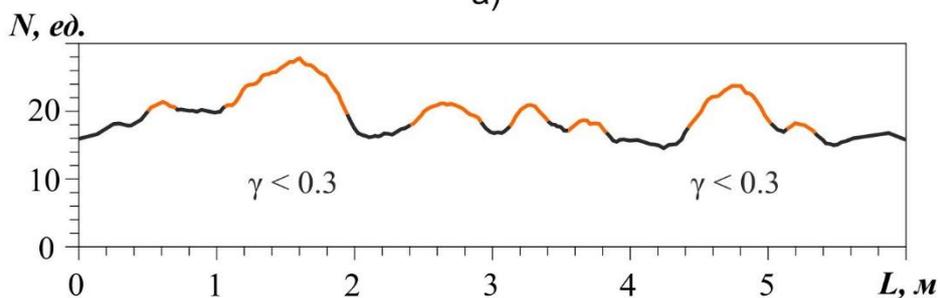
Экспериментальная установка, представляющая собой деревянный короб с размерами 6 м \* 1 м \* 1,5 м, была расположена на мерзлом грунте и заполнена вмещающей породой в виде мерзлого песка мощностью 1,25 м (рисунок 3.9а). В процессе моделирования применялся георадар «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1200, работающим на центральной частоте 1200 МГц [140, 155]. Исследование физической модели мерзлого массива горных пород реализовано при помощи двух методик измерений — профилирования и зондирования (рисунок 3.9б).



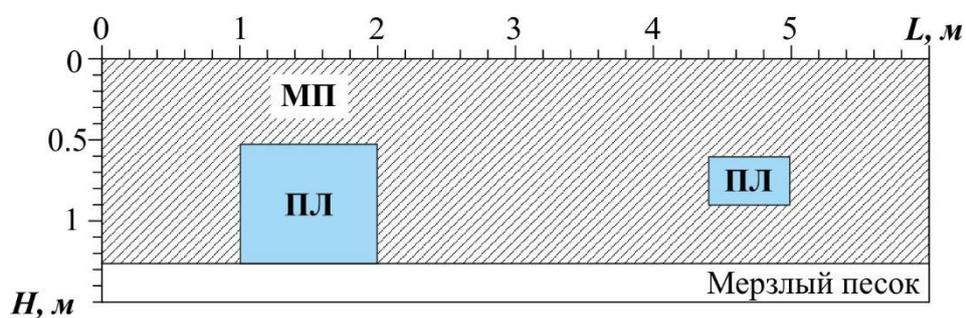
МП – мёрзлый песок, ПЛ – пластовый лёд, ГРЛ – георадар  
 Рисунок 3.9 – Схема модели массива горных пород с включением льдов (а)  
 и процесс георадиолокационных измерений георадаром «ОКО-2» (б)



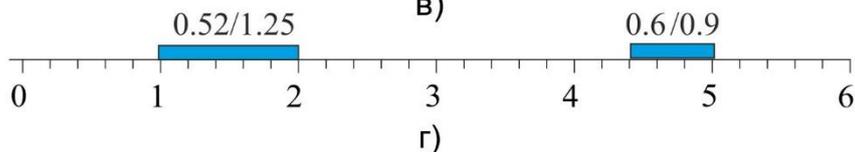
а)



б)



в)



г)

— атрибут местоположения  $h_{верх}/h_{нижняя}$ , м - глубина до границ объекта, его положение на профиле -  $L$ , м

Рисунок 3.10 –  
 Результаты основных  
 этапов обработки  
 данных физического  
 моделирования:  
 а) радарограмма с  
 выделенными осями  
 синфазности по первому  
 признаку;  
 б) график «изрезаннос-  
 ти» Фурье-спектров  
 георадиолокационных  
 трасс, с отмеченными  
 участками повышенных  
 значений  $N$ ;  
 в) схема геологического  
 разреза с установленны-  
 ми местоположениями  
 пластовых льдов;  
 г) результат  
 картирования  
 пластовых льдов по  
 георадиолокационному  
 профилю с указанием  
 глубины верхней и  
 нижней границ льда

На радарограмме, полученной по результатам выполненных георадиолокационных измерений (рисунок 3.10а), местоположение льдов по профилю обозначено белыми линиями. Соответствующие физическим границам льдов оси синфазности отраженных волн отчетливо прослеживаются на данной волновой картине.

Результат расчетов «изрезанности» Фурье-спектра георадиолокационных трасс всей радарограммы с усреднением каждой трех точек представлен на рисунке 3.10б. Соответствующие расположению пластовых льдов максимумы изрезанности отчетливо прослеживаются на данном графике. Находящиеся вне зон льдов остальные максимумы сформированы от волн помех, включая дифрагированные отражения ото льдов и от стенок короба, гиперболические отражения от локальных объектов, отражения от кровли мерзлого грунта и фрагментные отражения от нарушенной отсыпки.

### **3.1.3 Особенности обработки данных георадиолокационного картирования неоднородного массива мерзлых горных пород**

Ключевым фактором, ограничивающим внедрение георадиолокационных технологий для детального изучения строения массивов многолетнемерзлых горных пород, остается высокая трудоемкость обработки и интерпретации больших объемов данных. Штатные программные комплексы на текущем этапе не обладают функционалом для полноценного автоматизированного анализа динамических (амплитудно-временных) параметров волнового поля, хотя именно они несут фундаментальную информацию о строении и физическом состоянии среды.

Статистические методы анализа амплитудных характеристик георадиолокационных сигналов предлагается использовать для достижения более высокой оперативности и качества интерпретации данных. Возможность оценки нерегулярных сигналов, выступающих полезной информацией для автоматизации обработки, является главным преимуществом этого подхода, который является новым направлением в данной области. Применение таких методов в обработке и

интерпретации позволяет существенно расширить спектр задач, решаемых с помощью георадиолокации.

Выявление интерпретационных признаков зон неоднородностей слоистого строения массива мерзлых горных пород производилось путем сопоставления результатов георадиолокации с данными бурения и комплексирования с другими геофизическими методами. А также по результатам анализа волновой картины, при котором рассматривались конфигурация, интенсивность, протяженность осей синфазности, кинематические и динамические характеристики сигналов. Проведенными исследованиями установлено, что основными аномалиями георадиолокационных разрезов, связанными с неоднородностями строения массива горных пород, являются (рисунок 3.11): а) «хаотичные» сигналы на участках трещиноватых коренных пород (нарушенных структур); б) скачкообразное изменение времени задержки сигналов, характерное для пустот; в) разрывы осей синфазности сигналов с изменением времени задержки сигналов в зонах просадочных деформаций; г) подземный пластовый лёд (рисунке 3.11г): оси синфазности сигналов, расположенные одна под другой и противоположные по фазе сигналов; отношение амплитуд от границ льда (Анижн/Аверх) должно быть меньше  $0.95\Delta t$ , где  $\Delta t$  – время задержки сигнала во льду; «изрезанность» Фурье-спектра сигналов (раздел 3.1.2); д) полигонально-жильный лёд (рисунке 3.11д): дополнительно к признакам пластового льда необходимо: наличие двух гиперболических осей синфазности, расположенных одна под другой (рисунке 2.26).

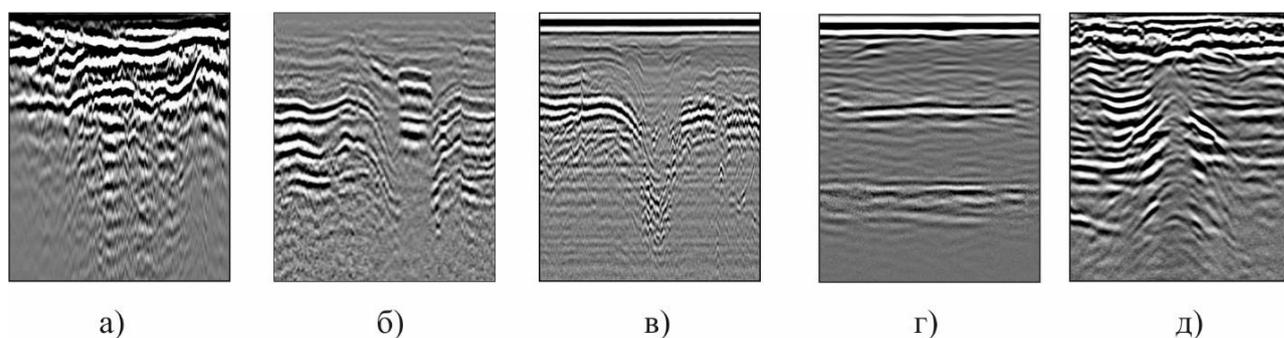


Рисунок 3.11 – Примеры радарограмм участков неоднородностей геологического строения массива горных пород россыпных месторождений: а) трещиноватые коренные породы; б) карстовые пустоты; в) западение плотика; г) пластовый лёд; д) полигонально-жильный лёд

Расчетные георадиолокационные модели, опыт георадиолокационных зондирований неоднородного массива мерзлых пород и натурные эксперименты показали, что локальные изменения свойств пород проявляются на георадиолокационном разрезе зонами с хаотичным распределением осей синфазности сигналов [85, 108, 135]. Появление подобных сигналов приводит к увеличению такой статистической характеристики, как дисперсия ( $Dx$ ), которая определяет отклонение амплитуд сигналов от среднего ожидаемого значения:

$$Dx = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}, \quad (3.9)$$

где  $X_i$  – амплитуда сигнала;  $\bar{X}$  – среднее значение амплитуды сигнала;  $k_1 \dots k_n$  – временной интервал анализируемой совокупности данных,  $n$  – количество значений амплитуд в анализируемой совокупности данных.

Это объясняется тем, что увеличение числа отражающих границ приводит к росту дисперсии амплитудно-временных характеристик. Данный процесс сопровождается повышением крутизны изменения дисперсии, значение которой зависит от количества хаотично распределенных сигналов в расчетном временном окне. Анализ особенностей характера изменения значения дисперсии амплитуд сигналов по разрезу позволяет определять тип геологической неоднородности: относительно сглаженное изменение дисперсии определяет слоистую неоднородную структуру, резкие изменения дисперсии соответствует нарушенной структуре с многочисленными локальными неоднородностями [205].

Результаты анализа дисперсии амплитуд георадиолокационных сигналов по профилю ( $Dx$ ) возможно применять для картирования участков пород повышенной влажности, нарушенных и разуплотненных грунтов, проявляющихся на георадиолокационном разрезе в виде зон с хаотичным распределением высокоамплитудных отраженных сигналов [109].

Распределение скоростей и затухание в среде происходит неравномерно по площади и глубине, поэтому для получения более достоверной информации оценки структурных особенностей и неоднородностей требует так называемой оконной (фрагментарной) обработки для каждой выделенной зоны. Поэтому процедуры математической обработки предлагается проводить также с разделением

георадиолокационного разреза по фрагментам (временным окнам). При этом параметры для каждого фрагмента разреза подбираются индивидуально. Такой алгоритм обработки обеспечит использование максимума информации об отраженных сигналах геологического разреза, как по глубине, так и по площади.

Данный алгоритм использован при выполнении работ по реконструкции литолого-структурной обстановки на алмазонасном месторождении Анабара. В сопоставлении с данными бурения выделены по площади основные аномальные зоны. Результаты иллюстрируются по радарограмме одного из георадиолокационных профилей участка 405 объекта «Маят-Водораздельный» (рисунок 3.12). Для большей наглядности георадиолокационный разрез был обработан (произведены фильтрация и линейное усиление).

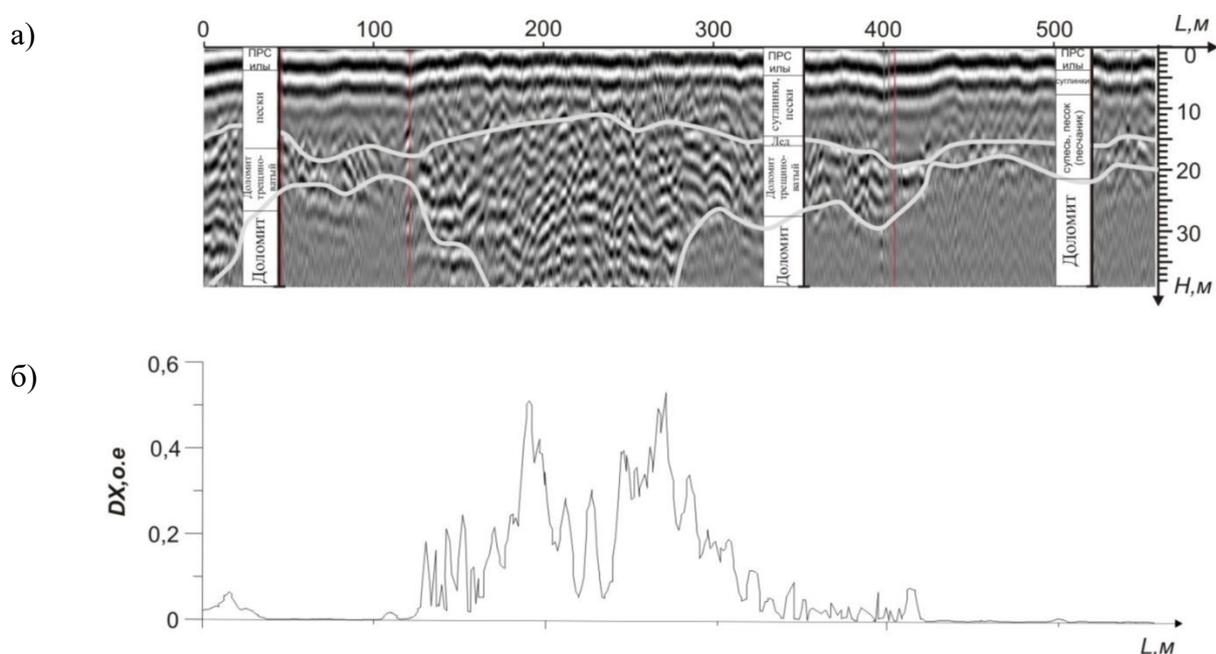


Рисунок 3.12 – Георадиолокационный разрез участка 405 с данными бурения и результат расчета дисперсии амплитудных значений:

- a)* интерпретационный георадиолокационный разрез;
- б)* расчет дисперсии амплитуд георадиолокационных сигналов

На отрезке профиля от 130 м до 400 м наблюдаются разнообразные кратные отражения, которые появились, судя по данным бурения, на границе пески-трещиноватые доломиты. Степень трещиноватости доломитов можно оценить по графику дисперсии, значение которой зависит от количества трещин и их размеров. Так как именно в них происходят переотражения сигнала искажающие георадиолокационные данные и затрудняющие их интерпретацию [97]. На

амплитуду этих сигналов также влияет заполнитель трещин (пески, суглинки и редкие линзы льда).

Анализ амплитуд после преобразования Гильберта позволяет выделить на радарограмме зоны наиболее интенсивных отражений низкой частоты. После такого преобразования [118] радарограмма делится на области с более высокой и низкой энергией сигнала, что делает волновое поле контрастным и упрощает выделение аномалий, связанных с различными геологическими структурами. Для примера выделения мгновенных амплитуд на рисунке 3.13 представлен фрагмент георадиолокационного разреза по профилю №7 участка 405.

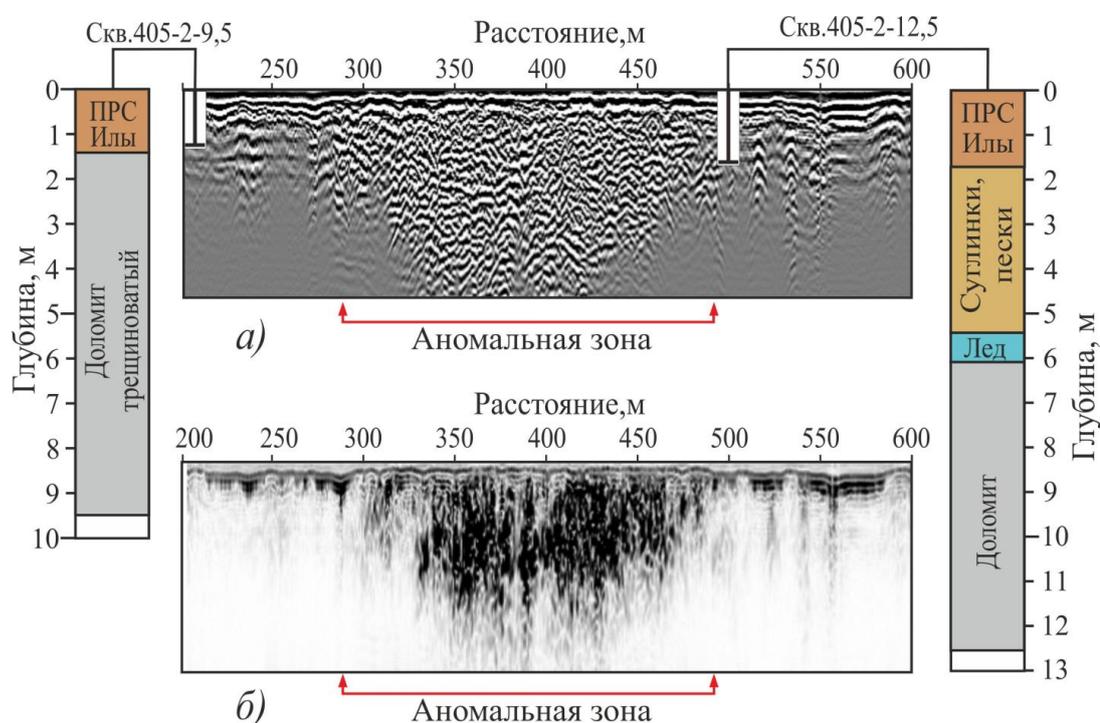


Рисунок 3.13 – Фрагмент георадиолокационного разреза по профилю №7 участка 405 с данными бурения (а) и результат выделения огибающей амплитуд (б)

По данным бурения верхняя часть разреза до глубины 1,8 м представлена почвенно-растительным слоем, с отложениями илов (рисунок 3.13а). По скважине 405-2-9,5, с глубины 1,4 м начинаются трещиноватые доломиты – на волновой картине они себя никак не проявляют и даже после преобразования эта зона остается низкоэнергетической, без заметных отражений. Связано это с наличием аномалии на отрезке 290-490 м, которая отличается интенсивными отражениями и после преобразования Гильберта выделяется как область с высокой энергией

сигналов (рисунок 3.13б). На ее фоне другие отражения уже не столь контрастны и практически незаметны.

Результаты площадных георадиолокационных исследований участка 405 объекта «Маят-Водораздельный» иллюстрируются на рисунке 3.14. Для удобства представления большого объема данных разрезы приведены в трехмерном виде, где отчетливо прослеживаются 2 участка аномалии георадиолокационных сигналов, выделенных по кинематическим, динамическим признакам сигналов и подтвержденных по расчету значения дисперсии георадиолокационного сигнала по профилю (рисунок 3.14) [152].

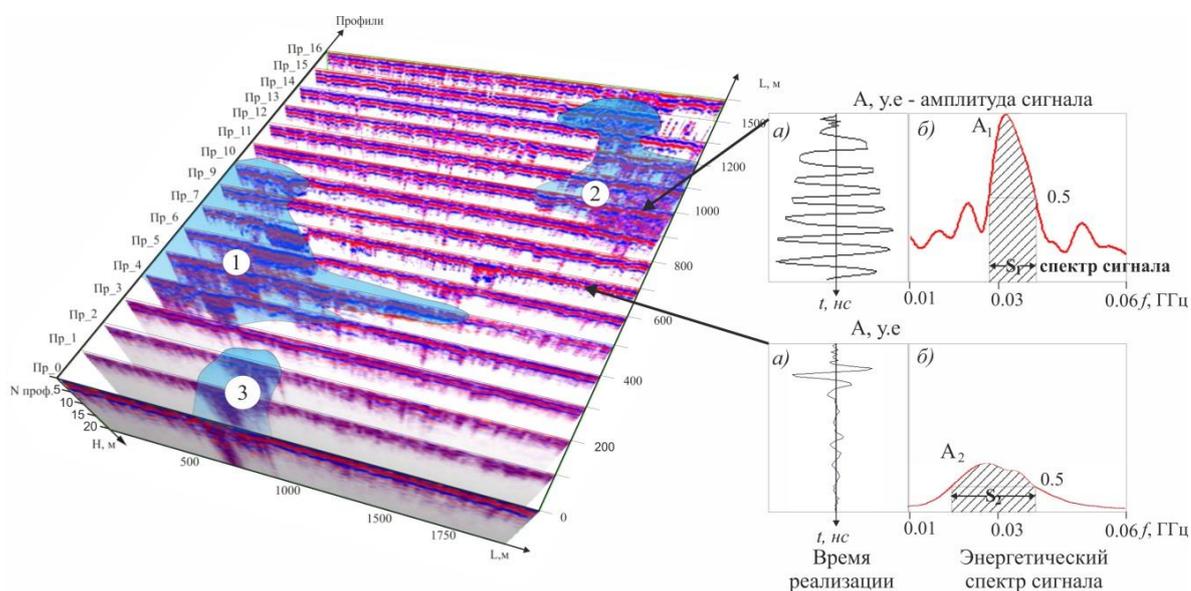


Рисунок 3.14 – Георадиолокационные профили с выделенными аномалиями:  
 а) по кинематическим критериям; б) по динамическим критериям

В процессе опытно-экспериментальных работ на участке прииска «Маят» были проведены исследования с целью установки корреляционной связи аномалий георадиолокации со структурными неоднородностями россыпных месторождений криолитозоны. В результате этих исследований установлено: области хаотичных, высокоамплитудных георадиолокационных сигналов и пониженных сопротивлений присутствуют над структурными неоднородностями, связанными с зонами, приуроченными к локальным эрозионно-карстовым депрессиям. Результаты интерпретации георадиолокации хорошо подтверждаются данными скважинного технологического опробования.

Для *комплексной обработки данных геофизических методов, включающих георадиолокацию* обосновано применение алгоритмов кластерного анализа, базирующихся на критерии максимального корреляционного подобия [152]. Технологическая цепочка обработки строится по иерархическому принципу: первоначально формируются независимые физические модели для каждого метода, после чего полученные атрибутивные параметры пересчитываются (интерполируются) на единую пространственную матрицу.

В результате интерполяции на общую сетку каждый её узел характеризуется набором значений двух или более параметров. На финальном этапе, именуемом корреляционным поиском, происходит автоматическое выделение статистически однородных зон (кластеров), в пределах которых наблюдается максимальная взаимосвязь анализируемых полей. При картировании структуры эти кластеры могут рассматриваться как основа для разбиения модели на литологические типы (рисунок 3.15) [113].

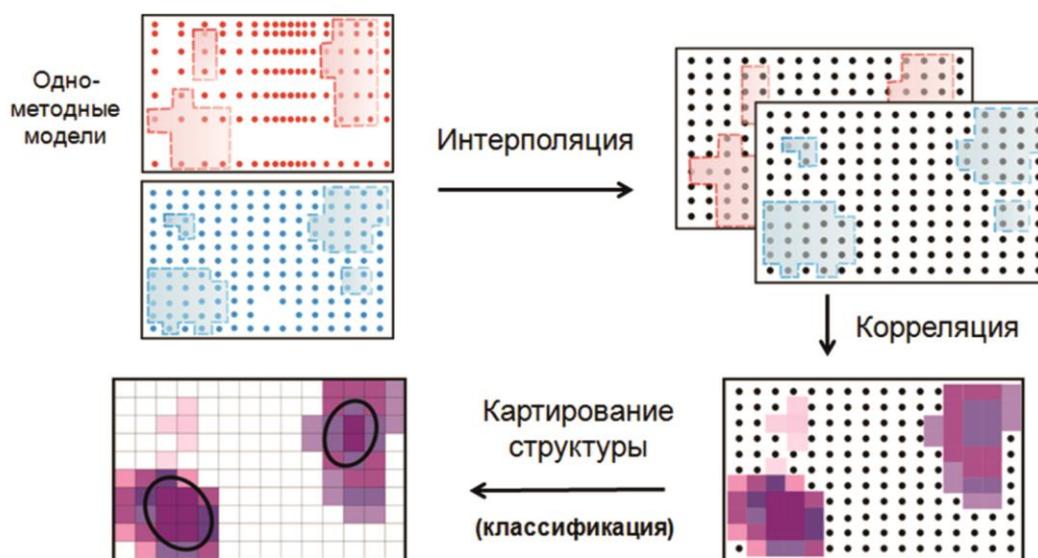


Рисунок 3.15 – Общая схема статистической структурной классификации с использованием моделей второго уровня

Практическая апробация предложенного алгоритма реализована на материалах натуральных изысканий, выполненных на полигоне «Маят-Водораздельный» (участок «405», активы АО «Алмазы Анабара», Якутская алмазоносная провинция) [159]. Основной целью проведенного эксперимента стала автоматизация интерпретации больших массивов информации. Для этого

выстраивался механизм, позволяющий находить корреляционные зависимости между такими данными, как георадиолокация (ГРЛ), ДЭМП и результаты кернового опробования.

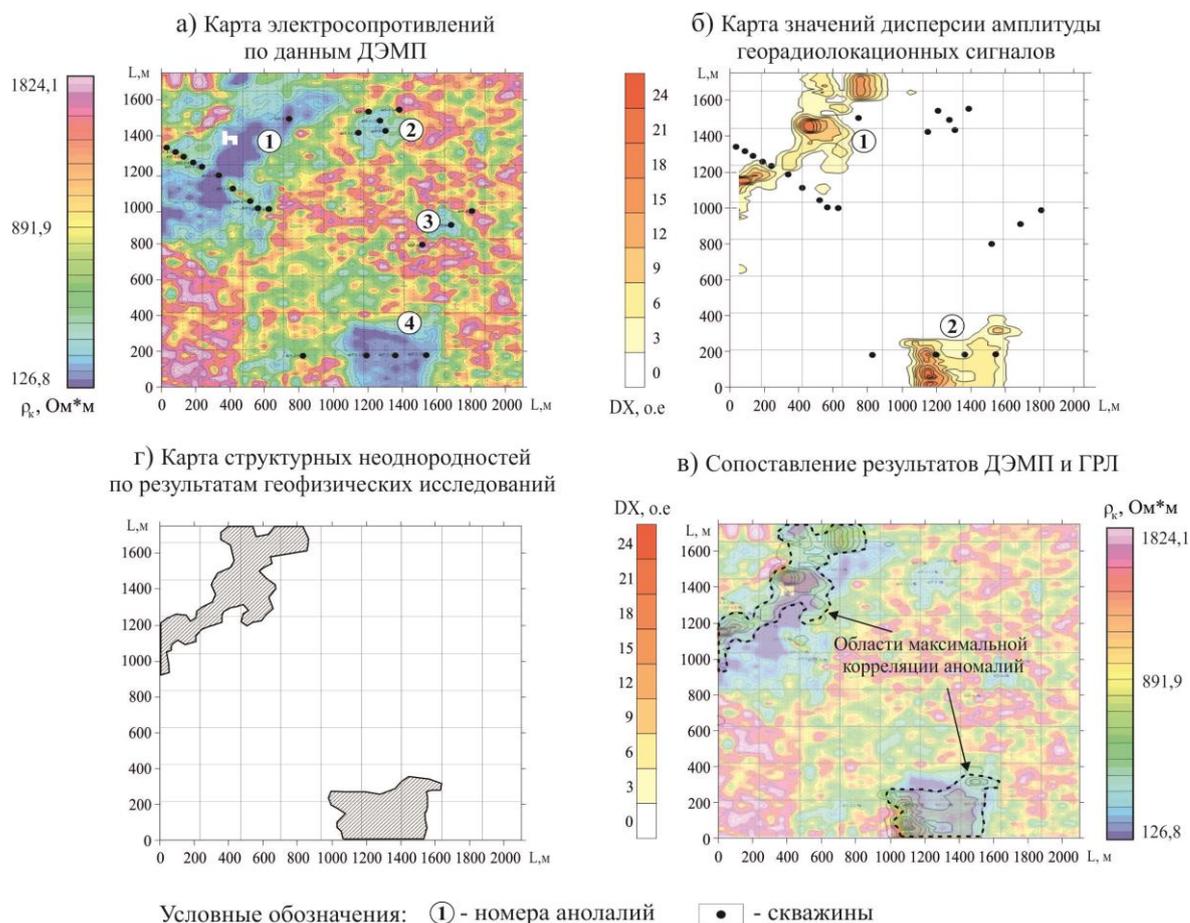


Рисунок 3.16 – Результат интерпретации комплексных геофизических данных картирования участка «405» месторождения «Маят-Водораздельный» методами георадиолокации и дипольного электромагнитного профилирования

Если опираться на стратиграфические данные, то фундамент исследуемой площади, перекрытый комплексом рыхлых осадков (илами, суглинками и песками), сформирован доломитами, которые в кровельной части являются интенсивно трещиноватыми. Сравнительный анализ геофизических полей показал следующую картину: по материалам ДЭМП были оконтурены четыре локальные зоны, маркируемые пониженным удельным электрическим сопротивлением (рисунок 3.16а). В свою очередь, статистическая обработка площадной георадарной съемки позволила выделить два участка, отличающихся аномально высокой дисперсией амплитуд сигнала (рисунок 3.16б). Интерпретация данных

аномалий связывает их наличие со структурно-текстурными неоднородностями массива: областями повышенной трещиноватости, скоплениями валунного материала или контурами погребенных палеоводотоков [152].

На рисунке 3.16в представлены две области, где низкое электросопротивление (по результатам ДЭМП) максимально коррелирует с пиковыми значениями дисперсии амплитуды сигналов георадиолокации. Эти зоны были выделены в ходе комплексного анализа геофизических данных. При этом аномалии 2 и 3, ранее обозначенные методом ДЭМП, по сведениям георадиолокации были отбракованы (рисунок 3.16а). Карта аномалий в уточненном виде приведена на рисунке 3.16г. Итоги сопоставления геофизических методов подтвердились разведочным бурением, что позволило интерпретировать данные аномалии как зоны, где коренные породы нарушены.

На основе статистической оценки параметров георадиолокационных сигналов удалось сформулировать основной признак, позволяющий эффективно выявлять зоны структурных неоднородностей. Для автоматизации обработки данных измерений была проведена апробация программного обеспечения. В основе работы этого ПО применяется вычисление дисперсии амплитудно-временных характеристик сигналов — алгоритм, позволяющий с высокой точностью идентифицировать аномалии в строении горного массива. С помощью данного инструментария эффективно выделяются такие структурные нарушения, как границы реликтовых водотоков, включения валунов, зоны повышенной трещиноватости и другие неоднородности [152].

### **3.2 Методика интерпретации свойств и состояния массивов горных пород по данным георадиолокационных исследований**

Наиболее значимыми для ведения горных работ геокриологическими параметрами массива горных пород, определенными на основе обзора геокриологических условий месторождений Якутии, разрабатываемых открытым способом, расположенных в субарктической и умеренной климатических зонах, являются распределение влажности в горных породах, условия залегания

подземных льдов и их геометрические характеристики, мощность сезонно-талого слоя (СТС) и его особенности, надмерзлотные воды, талики. В некоторых случаях представляют интерес следующие геокриологические явления: бугры пучения, полигональность поверхности, термокарстовые западения, склоновые процессы, наледи и пр.

### **3.2.1 Интерпретационные признаки и алгоритм обработки данных исследования геокриологических параметров массива горных пород**

Выявление интерпретационных признаков геокриологических параметров массива горных пород производилось путем сопоставления результатов георадиолокации с данными бурения и комплексирования с другими геофизическими методами. Анализ георадиолокационных волновых картин основывался на моделях геологических разрезов, включающих изучаемые криогенные объекты и процессы, и на особенностях распространения в них электромагнитных волн. При этом рассматривались конфигурация, интенсивность, протяженность осей синфазности, кинематические и динамические характеристики сигналов.

Опыт проведения георадиолокационных исследований показывает, что основными аномалиями георадиолокационных разрезов, связанными с криогенными процессами, являются (рисунок 3.17): а) переотражения сигналов на границе переувлажнения сезонно-талого слоя (СТС); б) высокое затухание амплитуды сигналов на участках повышенной влажности; в) высокие значения амплитуд сигналов в зонах пучения пород, которые образуют линзообразные оси синфазности; г) оси синфазности высокоамплитудных сигналов, характерные для границ сброса поверхностных вод или миграции надмерзлотных вод СТС; д) зона «хаотичных» сигналов, проявляющаяся деформацией поверхности, соответствует зоне суффозии, образующейся в результате выноса водным потоком части грунтов определенной фракции, в процессе их оттайки.

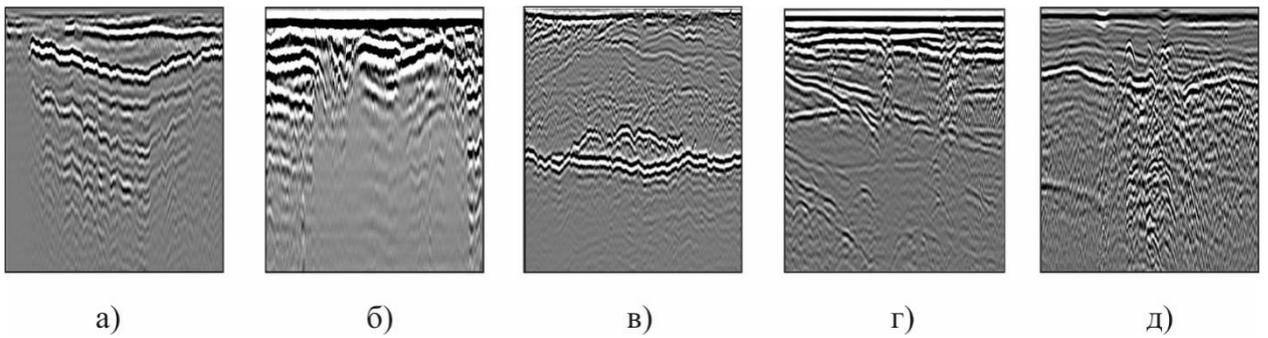


Рисунок 3.17 – Примеры радарограммы участков развития криогенных процессов: а) граница сезонно талого слоя; б) зона водонасыщенности грунтов; в) участок морозного пучения; г) границы миграции поверхностных вод в толщу ММП; д) зона суффозии.

*Картирование зон повышенной влажности.* При исследовании участков повышенной влажности методом георадиолокации на границе мерзлых ( $\epsilon'_1 = 4-6$ ) и талых, увлажненных ( $\epsilon'_2 = 20-30$ ) горных пород коэффициент отражения составляет около 0,4 и, соответственно, 40% энергии отражается вверх. Далее происходит циклическое переотражение электромагнитной волны на этой границе, которое формирует на радарограмме кратные по времени регистрации сигналы (рисунок 3.17а). По этим волнам переотражения можно определить глубину сезонно-талого слоя.

*Зоны водонасыщенности грунтов* проявляются на радарограмме участками высокого затухания амплитуды сигналов (рисунок 3.17б).

*Выявление участков пучения грунтов.* Участки морозного пучения грунтов отображаются на георадиолокационных данных в виде объектов линзообразной формы (рисунок 3.17в). Данные аномалии и дополнительные отражающие границы проявляются наиболее отчетливо в период протаивания грунтов, вызванного локальным изменением мерзлотно-грунтовых условий

*Миграция надмерзлотных вод сезонно-талого слоя* происходит по кровле многолетнемерзлых пород, представляющих собой водоупор. Коэффициент отражения электромагнитных волн ( $k$ ) на границе обводненных и мерзлых пород очень высок, вследствие чего георадиолокационные сигналы, отраженные от этой границы, имеют высокие амплитудные значения (рисунок 3.17г). В данном случае кратного переотражения сигналов не происходит из-за значительного поглощения электромагнитной энергии в талых породах [178].

*Определение зон суффозии.* Зоны суффозии образуются в результате выноса водным потоком части грунтов определенной фракции, что приводит к образованию нарушений горизонтально-слоистого строения массива горных пород (рисунок 3.17д). Наличие нарушенных структур вызванных ослаблением грунтов на радарограммах отображается дифракцией электромагнитных волн и образованием сигналов, не имеющих выраженных осей синфазности.

Перечисленные выше аномалии георадиолокационных разрезов, связанные с криогенными процессами, могут быть картированы в автоматическом режиме на основе использования статистических методов. Например, корреляционный анализ является оптимальным методом обнаружения сигнала известной формы на фоне белого шума. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при прослеживании осей синфазности георадиолокационных сигналов. При обработке данных, полученных в непрерывном режиме съемки, коэффициент корреляции соседних сигналов, отраженных от одной геологической границы, составляет 0,95-0,99, что позволяет с высокой точностью прослеживать отражающие границы даже в случаях резкого изменения положения на временной оси [138].

В зонах с переотражениями сигналов в георадиолокационных трассах присутствуют сигналы одинаковой формы, на кратных временах задержки и с убывающими амплитудными значениями (закономерность убывания зависит от электрофизических свойств исследуемых горных пород). В этом случае в результате вычисления коэффициента корреляции искомого сигнала-образца по всей длине анализируемой трассы будет присутствовать несколько локальных максимумов, проверка времени задержки которых позволит выявить их кратность и картировать зоны повышенной влажности горных пород. Если в результатах расчета коэффициента корреляции количество максимумов равно 2, то после проведения опережающей проверки последующих трасс (для исключения случайных выбросов) возможно прослеживание обеих осей синфазности. После анализа радиофизических характеристик сигналов временной промежуток между выявленными границами может быть отмечен как пучинистые породы. В случае, когда после расчета коэффициента корреляции количество максимумов равно 1 и

время задержки максимума значительно отличается, то после проведения опережающей проверки последующих трасс до возвращения границы на прежний уровень, этот участок следует отметить, как пустоту.

Просадочные деформации горных пород, проявляющиеся на радарограммах в виде круто наклонных границ, могут быть выявлены посредством вычитания из каждой трассы разреза соседней трассы (данные берутся по абсолютным значениям). Это исключит из георадиолокационного разреза горизонтальные элементы и оставит высокоамплитудные сигналы, имеющие наклонные оси синфазности. Полученный разрез будет содержать наибольшие значения в местах просадки. Для более точного определения участка просадки необходимо рассчитать мощность георадиолокационных сигналов вдоль разреза. Зоны разуплотнения грунтов на георадиолокационном разрезе отображаются высокоамплитудными, «хаотичными» сигналами, эти участки автоматически можно выделить по высоким значениям дисперсии амплитудных значений сигналов. Так как на подобных участках, как правило, появляются нерегулярные сигналы, которые сильно отличаются по своим радиофизическим характеристикам от сигналов, полученных при зондировании слоистых сред.

Границы талых и мерзлых горных пород, по которым осуществляется сброс поверхностных вод или миграция надмерзлотных вод сезонно-талого слоя, отличаются высокими значениями амплитуд. Для выявления таких границ необходимо отслеживать повышенные амплитудные значения при автоматизированном выявлении осей синфазности георадиолокационных сигналов с помощью расчета коэффициента корреляции.

Для выявления указанных выше аномалий георадиолокационного разреза предлагается проводить обработку по алгоритму, представленному на рисунке 3.18.

В начале обработки производится ввод исходных данных:

1. Количество трасс в георадиолокационном разрезе (КТ);
2. Сигнал-образец;
3. Амплитуда сигнала образца (А);

4. Время задержки сигнала-образца (ВЗС);
5. Номер обрабатываемой трассы (N).

Выполнение первых двух процедур позволяет выявить аномалии, связанные с просадкой и разуплотнением горных пород, а для определения наличия аномалий остальных типов производится последовательный расчет коэффициента корреляции сигнала-образца со всеми трассами анализируемого георадиолокационного разреза.

Далее анализируется количество максимальных совпадений (KM), т.е. производится поиск сигналов максимально похожих на образец, при этом регистрируется время задержки для каждого максимума (ВЗМ) и амплитудное значение сигнала (At). Наличие остальных аномалий определяется на основе анализа параметра KM, в соответствии с выявленными амплитудно-временными особенностями георадиолокационных сигналов.

Для решения задач автоматизированной интерпретации данных была выполнена разработка специализированного ПО [95]. Продукт создан в среде Delphi; визуализация его пользовательского интерфейса приведена на рисунке 3.19.

Инструментарий программы позволяет оператору решать следующие задачи:

- Нормализация данных: Проведение процедуры уравнивания плотности (количества) точек зондирования в разрезах, сформированных по результатам площадной съемки;
- Управление масштабом: Настройка требуемой степени детальности отображения данных в плановой проекции;
- Анализ волнового поля: Выделение конкретных интервалов амплитуд на временной развертке сигнала. Это необходимо для корректного вычисления параметров дисперсии, привязанных к различным глубинным горизонтам.

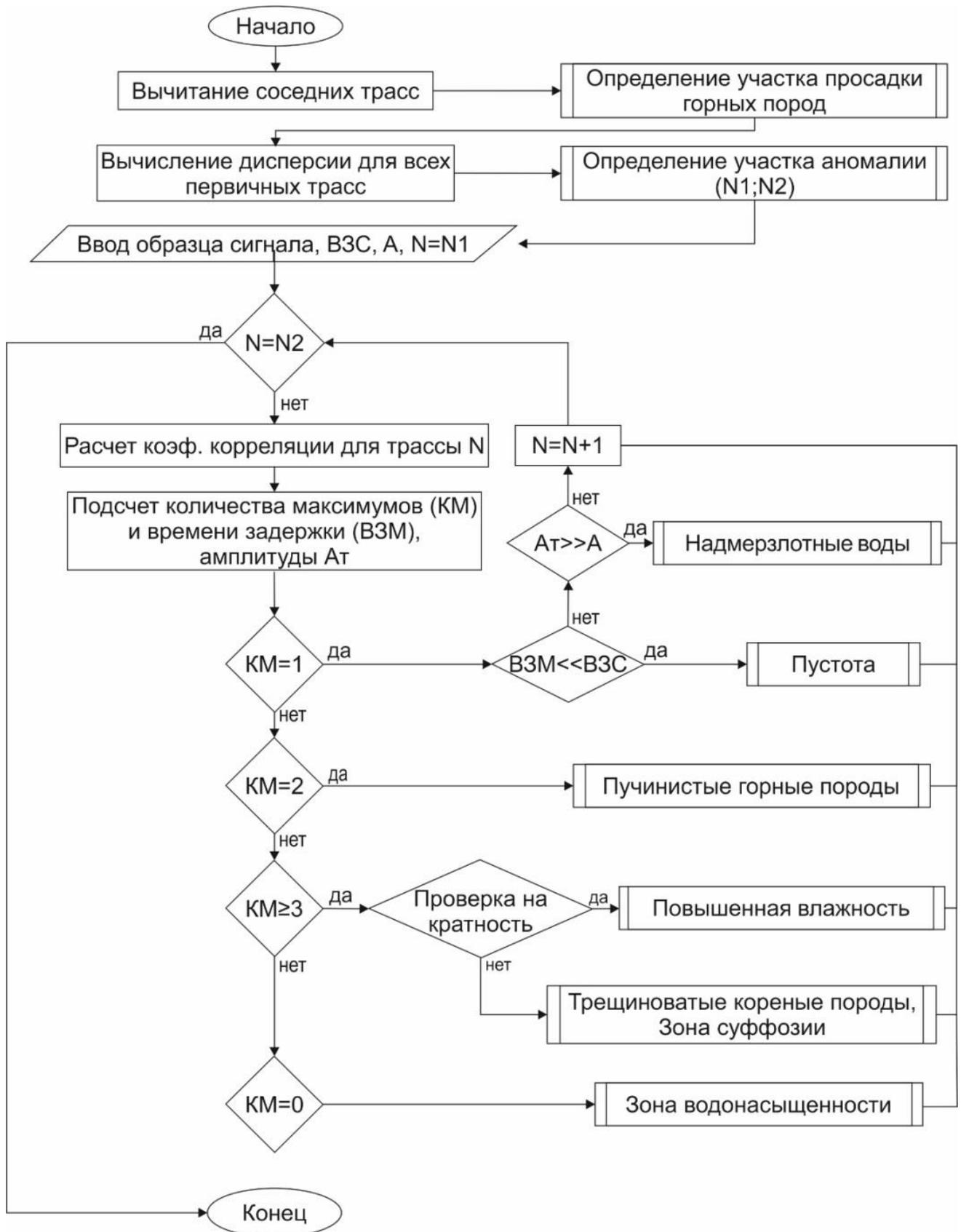


Рисунок 3.18 – Блок-схема алгоритма обработки данных для выделения аномалий георадиолокационных разрезов при картировании неоднородностей массива горных пород

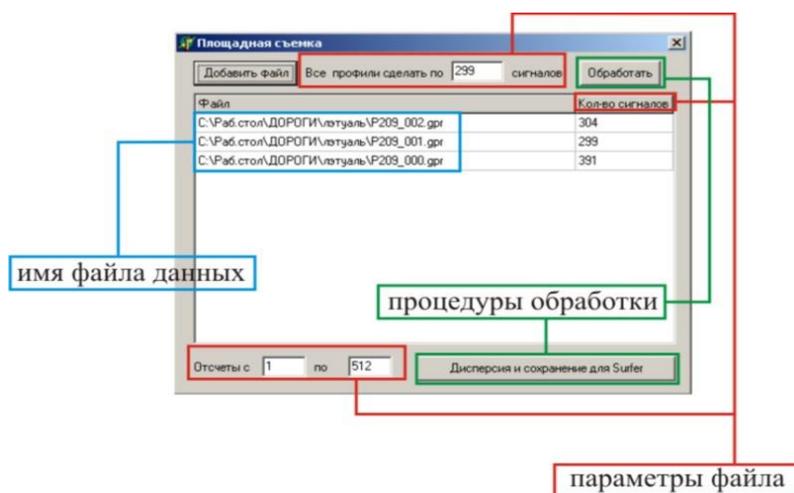


Рисунок 3.19 – Интерфейс разработанного программного обеспечения

Для выявления аномальных зон предлагаются следующие дополнительные процедуры обработки:

- 1) выбирается динамически ограниченное временное окно обработки данных;
- 2) выравнивание количества точек зондирований;
- 3) расчет дисперсии амплитуд сигналов по профилям;
- 4) межпрофильная интерполяция;
- 5) экспорт георадиолокационных сигналов в программу Surfer.

На рисунке 3.20 представлены результаты апробации разработанного программного обеспечения при обработке данных комплексных геофизических работ на участке алмазонасной россыпи месторождения «Маят».

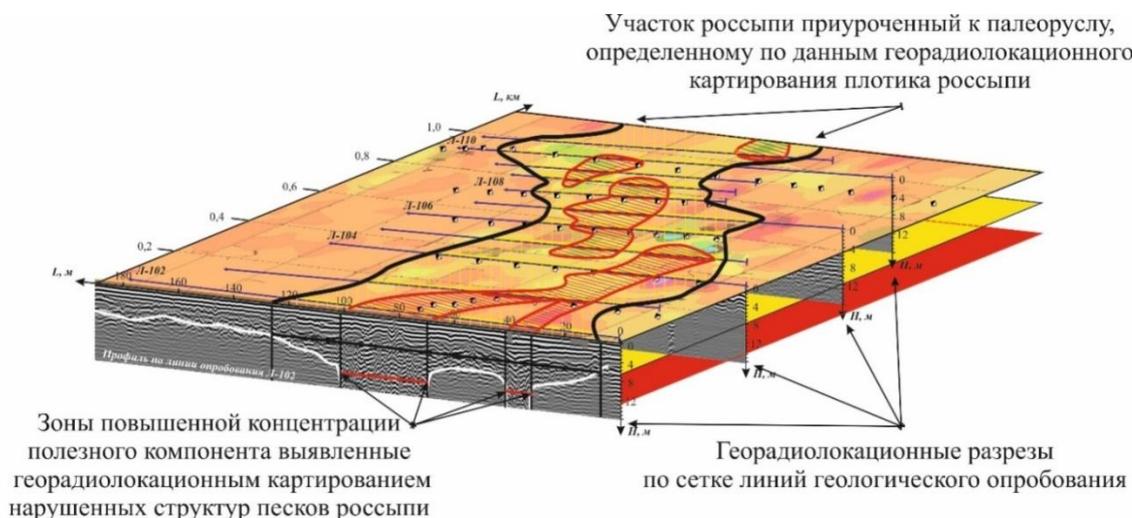


Рисунок 3.20 – Результат картирования пространственного распределения полезного компонента на участке алмазонасной россыпи месторождения «Маят»

На георадиолокационных разрезах участка фиксируется отраженная граница на глубине порядка 3-5 м, интерпретируемая как подошва торфов. Очень хорошо прослеживаются ось синфазности отраженных волн в условиях сильного затухания, характеризуемая как неоднородная структура ниже торфов, и граница коренных пород на глубине порядка 10-15 м. Уверенно прослеживаются контрастные отражения, предполагаемые как участки аномальной зоны, выделяющиеся более высокоамплитудными значениями по сравнению с соседними участками профиля. Эти результаты дополнены исследованиями по площадной съемке параллельными профилями для трехмерной визуализации. По данным георадиолокационной съемки построена карта основной россыпи с участками структурных разломов. Результаты обработки георадиолокационных исследований и геологического опробования нанесены на карту компонентного анализа магниторазведки и ДЭМП и комплексно проинтерпретированы с учетом всей геофизической и геологической информации. Результат приведенных исследований подтвержден отработкой россыпи по указанным контурам. Коэффициент корреляции результатов геофизических исследований и данных геологического опробования составил 0,83.

### **3.2.2 Программно-информационное обеспечение картирования строения и состояния массива горных пород**

Метод георадиолокации в последнее время стал широко применяться для исследования различных геокриологических структур [127, 133, 153, 245]. Однако построение на основе его данных точных 3D-моделей (например, пластового льда) невозможно без обоснованного заполнения межпрофильного пространства. Этот процесс должен опираться на геологические особенности конкретного массива горных пород. Для устранения данной проблемы требуется разработка специального алгоритма, в котором будут заложены как параметры геофизических измерений, так и специфика строения и формы изучаемого объекта. Необходимость таких изысканий продиктована тем, что при освоении территорий криолитозоны — в частности, горными предприятиями — геокриологические

структуры выступают значимым негативным фактором. Их наличие провоцирует развитие таких опасных процессов, как солифлюкция, термокарст, термоэрозия и другие [23, 57, 86, 190].

Основным объектом для разработки алгоритма является подземный пластовый лед в массиве многолетнемерзлых пород. Оптимальные размеры ячеек трехмерной структурированной сетки — основы геокриологической модели — определяются исходя из минимальной мощности (толщины) ледяного тела и параметров геофизической съемки.

На основе данных георадиолокации [116, 125, 247] выделяются ледяные включения и формируется таблица интервалов их залегания (Таблица 3.1) Пикеты всех профилей имеют координаты в плановом положении в системе плоских прямоугольных координат (X-Y).

Таблица 3.1 – Пример таблицы интервалов и глубин залегания границ подземных льдов

Профиль	Пикет	x	y	Глубина залегания	
				верхней границы льда (T), м	нижней границы льда (L), м
1	0	x <sub>10</sub>	y <sub>10</sub>	1,39	4,81
1	1	x <sub>11</sub>	y <sub>11</sub>	1,65	5,16
1	2	x <sub>12</sub>	y <sub>12</sub>	2,02	5,68
1	3	x <sub>13</sub>	y <sub>13</sub>	-	-
1	4	x <sub>14</sub>	y <sub>14</sub>	-	-
1	5	x <sub>15</sub>	y <sub>15</sub>	2,41	6,86
1	6	x <sub>16</sub>	y <sub>16</sub>	2,22	7,01
1	7	x <sub>17</sub>	y <sub>17</sub>	1,99	6,90
...	...	...	...	...	...

Для построения цифровой трёхмерной модели геокриологических структур формируется трёхмерная сетка, в узлах которой содержится информация о пространственных координатах (положение узла в плане и по глубине) и отметки наличия либо отсутствия льда (цифровые маркеры).

Подготовка трехмерных данных, необходимых для последующей визуализации объемных изображений в графических редакторах, осуществляется на базе разработанного алгоритма, структура которого включает пять последовательных стадий.

Этап 1. Расчёт параметров трёхмерной структурированной сетки с пространственной привязкой узлов сетки. В качестве параметров трехмерной структурированной сетки  $S(x,y,z)$  выступают величины дискретизации пространства ( $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$ ) между соседними узлами. Ориентация осей принята следующим образом: ось  $Y$  сонаправлена с вектором геофизического профилирования, ось  $X$  ориентирована вкост простирания профилей, а ось  $Z$  соответствует глубине. Определение линейных размеров элементарной ячейки — ширины ( $dX$ ), длины ( $dY$ ) и высоты ( $dZ$ ) — базируется на технических параметрах выполненной геофизической съемки, а также на минимальных значениях мощности зафиксированных тел подземного льда. Графическая интерпретация ячейки сформированной сетки  $S(x,y,z)$  с размерностью  $dX*dY*dZ$  продемонстрирована на рисунке 3.21.

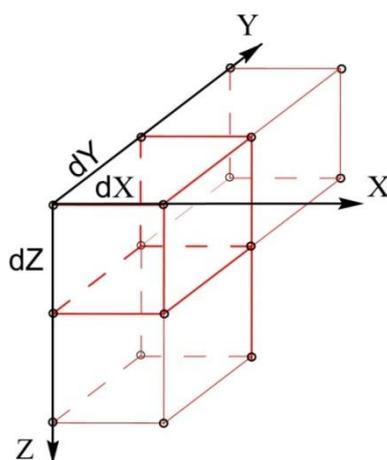


Рисунок 3.21 – Ячейка трёхмерной структурированной сетки ( $S$ )

Размер  $dX$  определяется как:  $dX = \min(\text{межпрофильное расстояние})/2$ , т.к. необходима, как минимум, одна промежуточная точка между профилями, для построения достоверной трехмерной модели.

Для обеспечения точности представления геокриологических объектов в плане, параметр  $dY$  рекомендуется рассчитывать по формуле:  $dY = \lambda_1/4$ , где  $\lambda_1$  - радиус первой зоны Френеля, используемого георадара.

Параметр  $dZ$  выбирается исходя из необходимой точности измерений по глубине  $k$  (в метрах), позволяющей достоверно отобразить лёд минимальной мощности:  $dZ = h_{\text{пласт.лед.мин}}/k$ , где  $h_{\text{пласт.лед.мин}}$  - наименьшая мощность подземного

пластового льда, вычисляемая по формуле:  $h_{\text{пласт.лед.мин}} = \min(h_{\text{нижн.гр.л.}} - h_{\text{верх.гр.л.}})$ , где  $h_{\text{нижн.гр.л.}}$ ,  $h_{\text{верх.гр.л.}}$  – глубина залегания нижней и верхней границ льда соответственно.

После расчёта параметров сетки  $S(x,y,z)$ , во все её узлы записывается цифровой маркер=0, обозначающий отсутствие льда в соответствующей точке исследуемого массива многолетнемёрзлых горных пород.

*Этап 2. Внесение информации о выявленных геокриологических структурах в узлы сетки, соответствующие георадиолокационным профилям и точкам углового сканирования.* Для заполнения сетки  $S(x,y,z)$  информацией о выявленных геокриологических структурах, необходимо внести цифровой маркер = 1, в узлы сетки  $S$ , в соответствии с данными Таблицы 3.1 по формуле:  $S(\text{Профиль}, \text{Пикет}, z)=1$ , где  $z \in [T/dZ; L/dZ]$ .

На данном этапе производится заполнение узлов, входящих в интервал между верхней и нижней границами льдов, для каждого профиля (рисунок 3.22). Всем узлам присваиваются пространственные координаты, рассчитанные на основе параметров трехмерной структурированной сетки (координаты по осям  $X$  и  $Y$ ) и обработки результатов геофизических измерений (координаты по оси  $Z$ ).

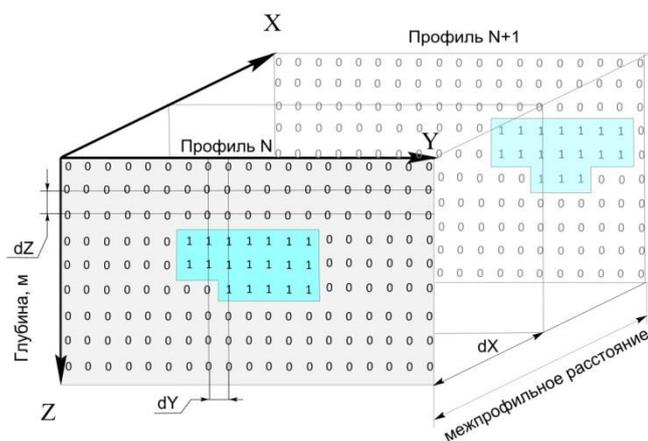


Рисунок 3.22 – Сетка  $S(x,y,z)$  с начальными значениями

*Этап 3. Вычисление параметров алгоритма обратных взвешенных расстояний (ОВР).* Обоснованный подбор метода интерполяции сведений, полученных при геофизических исследованиях и бурении скважин (включая проходку шурфов), гарантирует высокую информативность трёхмерной модели геокриологических структур. Данный подход применяется для заполнения тех узлов сетки  $S(x,y,z)$ , которые находятся в пространстве между профилями.

Интерполяция проводится с использованием интерполяторов, разделяемых на два класса — сглаживающие и точные, выбор в пользу которых диктуется характером конкретной задачи. Геостатистический инструментарий, задействованный почти во всех сглаживающих интерполяторах, предполагает наличие значительного массива априорных данных для обработки межпрофильного пространства [33, 38].

Формула, базирующаяся на весовых коэффициентах, лежит в основе почти всех точных интерполяторов, тогда как разница между ними заключается в специфике алгоритмов расчета данных коэффициентов. В качестве одного из вариантов точного интерполятора для заполнения сетки  $S(x,y,z)$  предлагается метод обратных взвешенных расстояний (ОВР), что обусловлено спецификой залегания подземных пластовых льдов (стабильностью или незначительной изменчивостью их мощности и глубины в пространстве). Ключевое достоинство ОВР заключается в высокой чувствительности к кластерному характеру распределения данных, что критически важно для корректного формирования трёхмерной модели подземных пластовых льдов.

В методе ОВР предполагается, что каждый узел  $A_j$  оказывает локальное влияние на значение в расчётном узле  $A$ , которое зависит от расстояния между  $A_j$  и  $A$ . Вес  $W_j$  узла  $A_j$  является функцией от расстояний  $D_i$  до соседних узлов:

$$A = \sum A_j * W_j, \quad (3.10)$$

$$W_j = \frac{1}{D_j^m} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^m} \quad (3.11)$$

где  $A_j$  – значение цифрового маркера в  $j$ -том ближайшей узле;  $D_i$  – расстояние от  $i$ -того ближайшего узла до расчетного узла  $A$ ;  $m$  – показатель степени, определяющий размер кластера;  $n$  – количество ближайших точек, используемых для расчета значения в узле  $A$ .

Для эффективного использования метода ОВР необходимо подобрать два параметра:  $m$  и  $R$ - радиус окрестности, в которой производится поиск ближайших узлов. На основе апробации методики георадиолокационного картирования установлено, что значение  $R$  целесообразно определять по следующему

эмпирическому правилу:

$$R = \sqrt{3} \text{УМПР}/2, \quad (3.12)$$

где УМПР – усреднённое межпрофильное расстояние.

Анализ показывает, что величина  $A$  зависит от показателя степени  $m$  (Таблица 3.2). Увеличение  $m$  повышает степень локализации (кластеризации) данных. Это соответствует геологической природе объекта: подземный лед представляет собой локальное включение, а не неразрывную поверхность. Значение  $m$  выбирается индивидуально для каждого участка на основе усредненного межпрофильного расстояния (УМПР)

Таблица 3.2 – Влияние показателя степени  $m$  на искомое значение  $A$

$m$	Смысл значения показателя степени
0-1	Влияние расстояния от узла $A$ слабое.
1	Расстояния влияют пропорционально величине обратного расстояния ( $W=1/D$ ).
>1	Чем больше степень $m$ , тем сильнее влияет ближайший узел на $A$ по сравнению с более отдалёнными узлами. Если $m$ стремится к бесконечности, то метод начинает работать как метод ближайшего значения.

Для выбора  $m$  производится расчёт весовых коэффициентов  $W(m,R)$ , где  $m \in [1; \log_{\text{УМПР}} 10^4]$ , а  $R$  вычисляется по формуле 3.11. Максимальное значение  $m$  определяется, исходя из эмпирического условия  $\text{УМПР}^{-m} > 10^{-4}$ , и, соответственно:

$$\begin{aligned}
 1 &> \text{УМПР}^m * 10^{-4} \\
 \frac{1}{10^{-4}} &> \text{УМПР}^m \\
 \sqrt[m]{10^4} &> \text{УМПР} \\
 \ln \sqrt[m]{10^4} &> \ln \text{УМПР} > \frac{\ln 10^4}{\ln \text{УМПР}} \\
 m &> \log_{\text{УМПР}} 10^4
 \end{aligned}$$

На рисунке 3.23 представлен пример графика  $W$ , по которым возможен выбор значения параметра  $m$ , исходя из условия:

$$\Delta W = (W_{(m)} - W_{(m-1)}) / W_{(m-1)} < 10\%$$

*Этап 4. Внесение информации о геокриологических структурах в узлы сетки, расположенных в межпрофильном пространстве, на основе интерполяции методом ОВР по горизонтальным плоскостям трёхмерной сетки производится автоматизированным способом с помощью имеющегося программного обеспечения, либо специализированного, разработанного под конкретные требования по быстродействию и поддержке архитектуры процессора.*

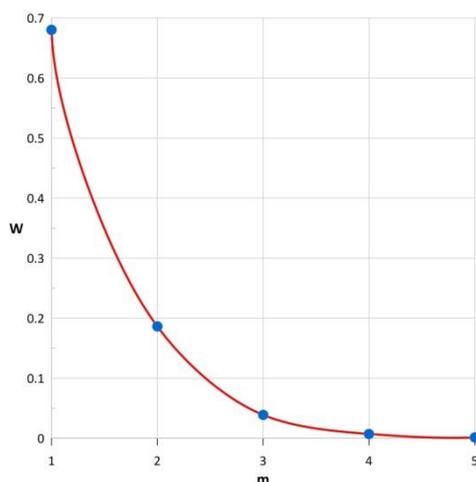


Рисунок 3.23 – График зависимости W от значений m

Для визуализации сетки  $S(x,y,z)$  в трехмерном виде сформирована таблица экспорта данных. Она содержит координаты узлов и соответствующие им значения цифровых маркеров (Таблица 3.3)

Таблица 3.3 – Формат таблицы для передачи данных в редактор 3D-графики

Профиль	Пикет	Плоские прямоугольные координаты узла		Глубина залегания узла, Z	Цифровой маркер
		X	Y		
0	0	X <sub>00</sub>	Y <sub>00</sub>	Z <sub>00</sub>	0
0	1	X <sub>01</sub>	Y <sub>01</sub>	Z <sub>01</sub>	0
0	2	X <sub>02</sub>	Y <sub>02</sub>	Z <sub>02</sub>	1
...	...	...	...	...	...
1	0	X <sub>10</sub>	Y <sub>10</sub>	Z <sub>10</sub>	1
1	1	X <sub>11</sub>	Y <sub>11</sub>	Z <sub>11</sub>	1
1	2	X <sub>12</sub>	Y <sub>12</sub>	Z <sub>12</sub>	0

*Этап 5. Построение в редакторе 3D-графики поверхности на основе рассчитанной трёхмерной сетки.*

Процесс построения поверхности в редакторе 3D-графики (на примере ПО Voxler) включает в себя следующие шаги:

- 1) В среду редактора загружается таблица в одном из поддерживаемых форматов;
- 2) Ввод данных о параметрах этой таблицы, где указывается расположение столбцов, которые соответствуют цифровым маркерам и координатам узлов;
- 3) В модуле Transform выполняется настройка параметров отображения модели (углы поворота, масштаб осей и прочее);
- 4) Работа в модуле Isosurface, где производятся построение и настройка изоповерхности, включая выбор её прозрачности, цвета и других характеристик.

В Центральной Якутии были проведены исследования, в ходе которых прошла апробацию разработанная методика подготовки трёхмерных данных георадиолокационных измерений и результатов бурения скважин (проходки шурфов) [111]. Площадка для работ размером 140 x 60 м и характеризовалась ровным рельефом, будучи ограниченной существующей застройкой. Геологический разрез участка представлен суглинистыми грунтами, которые относятся к четвертичным аллювиальным отложениям.

Для обеспечения достоверности и полноты выделения геокриологических структур, исследования проведены по равномерной сети 6 параллельных профилей, усредненное межпрофильное расстояние между которыми составило  $UMPP=8$  м, а в недоступных для профилирования местах выполнены измерения в 3 точках методом углового георадиолокационного сканирования [66, 90, 207, 226].

По итогам георадарной съемки составлены таблицы глубин залегания льда. На их основе сформирована трехмерная структурированная сетка с размером ячейки  $0,2*0,2*0,1$  м ( $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$ ). Для создания модели использован метод бинарного кодирования: узлам внутри ледяного пласта присвоен маркер «1», а точкам в межпрофильном пространстве — маркер «0». Интерполяция данных выполнена методом обратных взвешенных расстояний (IDW) с параметрами  $m=4,1$  и  $R=6,92$  м. Результирующий массив координат и маркеров экспортирован в 3D-редактор, где построена изоповерхность, визуализирующая подземный пластовый лед (рисунок 3.24) [48, 49, 56, 124].

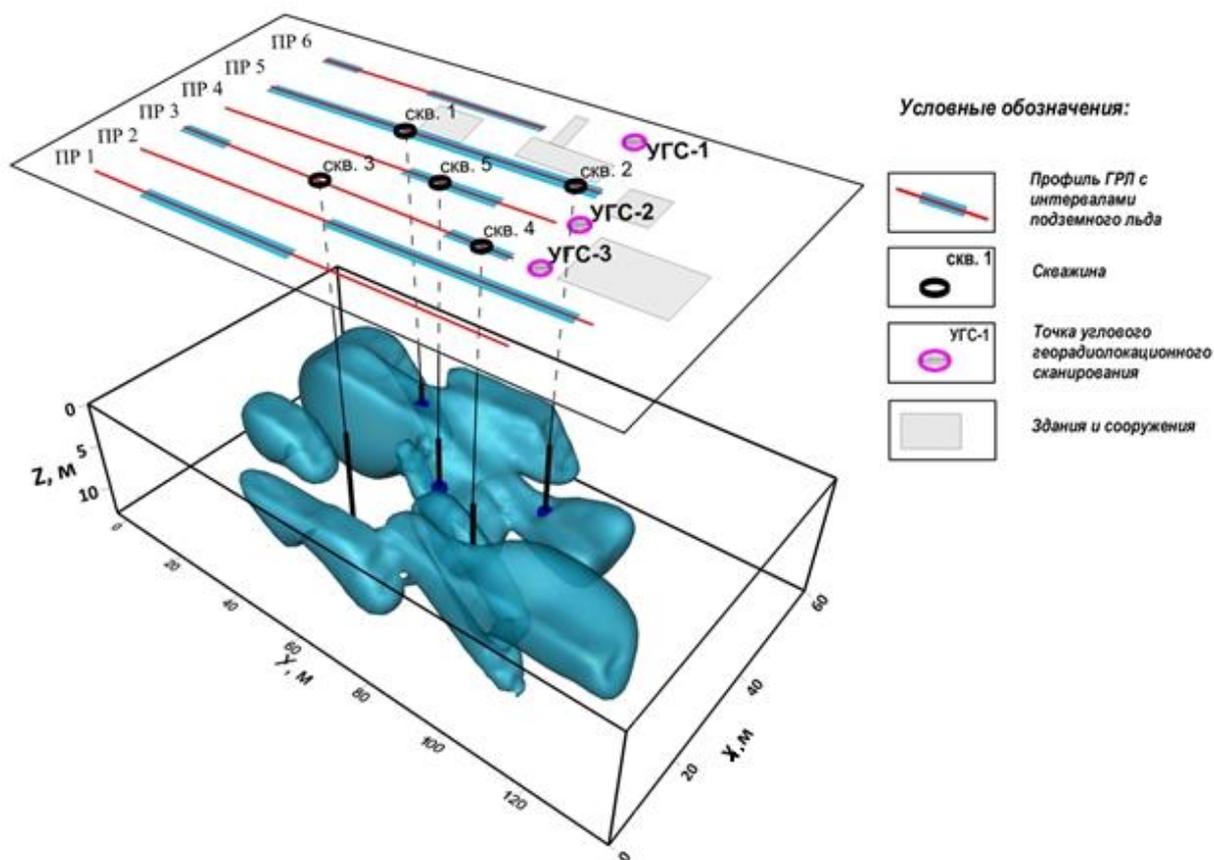


Рисунок 3.24 – Результат 3D картирования подземных льдов массива многолетнемерзлых горных пород на основе комплексной геолого-геофизической информации

Центральная часть исследуемой площади послужила местом для бурения пяти 15-метровых скважин, предназначенных для заверки результатов георадиолокации. В ходе этих работ наличие ледяных массивов подтвердилось в четырех выработках, где кровля залегания подземного льда была зафиксирована на уровне 2–2,5 м с последующим распространением до глубины 12 м [124]. Использование полученных данных позволило разработать трехмерную модель геокриологической структуры. Высокая точность модели обеспечивает достоверную пространственную оценку строения массива, что расширяет возможности для визуализации, прогнозирования и контроля геокриологической обстановки на объекте.

### Выводы к главе 3

Анализ особенностей характера изменения значения дисперсии амплитуд сигналов по разрезу позволяет определять тип геологической неоднородности: относительно сглаженное изменение дисперсии определяет слоистую неоднородную структуру, резкие изменения дисперсии соответствует нарушенной структуре с многочисленными локальными неоднородностями.

Разработан алгоритм обработки данных георадиолокации массива горных пород, имеющего горизонтально-слоистое строение, посредством полуавтоматической пикировки (отметки) осей синфазности сигналов на радарограмме, для выделения границ слоев пород, имеющих различные электрофизические свойства, что позволяет определить морфологическое строение участка исследования.

Определены интерпретационные признаки участков неоднородностей геологического строения массива. Предложен алгоритм анализа кинематических и динамических характеристик георадиолокационных сигналов для картирования неоднородностей массива горных пород. Реализация данного алгоритма при обработке данных георадиолокации позволила выявить зоны повышенной трещиноватости, валунных включений, границ реликтовых водотоков и т.д.

В результате проведенных исследований выработаны георадиолокационные признаки распознавания пластового льда, зон повышенной влажности, участков пучения пород, зон суффозии. Показана возможность эффективного применения выделенных интерпретационных признаков для оценки сложности инженерно-геокриологических условий ведения горных работ.

Разработан способ автоматизации обработки больших объемов данных и установления корреляционной связи георадиолокационных аномалий с результатами измерений методами электросопротивлений с использованием кластерного анализа на основе метода максимального корреляционного подобия.

Разработан и апробирован алгоритм построения объёмного изображения подповерхностного объекта, учитывающий параметры геофизических измерений, а также форму и строение изучаемой геокриологической структуры.

## **ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ ДИСПЕРСНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И ГРУНТОВ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

Промышленное освоение месторождений криолитозоны показало необходимость контроля влажности горных пород, которая является весьма важной характеристикой, так как влияет на основные физико-механические свойства пород. Знание распределения влажности в горных породах криолитозоны необходимо как при эксплуатационной разведке месторождений, так и при контроле устойчивости грунтов оснований горнотехнических сооружений.

### **4.1 Экспериментальное исследование скорости распространения георадиолокационных сигналов в мерзлых горных породах в процессе их оттайки**

На базе ИГДС СО РАН были проведены лабораторные исследования зависимости радиофизических характеристик георадиолокационных сигналов образцов горных пород (кварцевый и горный песок), характерных для четвертичных отложений Центральной Якутии от их влажности и температуры. В процессе эксперимента проводились заморозка и последующая оттайка образцов горных пород с различной влажностью. Исследуемые пески помещались поочередно в контейнер из ДСП. Размеры контейнера 0,5м x 0,5м x 0,25м. Изготовление образцов и определение влажности песков (W, %) осуществлялось согласно ГОСТ 5180-2015 [28]. Подготовленные пески с различной влажностью в количестве 12 образцов поочередно помещались в холодильную камеру «Castlcool» и выдерживались при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  до полной заморозки в течение от 1 до 3 дней. После этого исследуемые образцы извлекались из камеры и находились при температуре  $+22^{\circ}\text{C}$  до полной их оттайки. Исследование образцов проводилось контактным зондированием георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 1200 МГц (рисунок 4.1). Измерение температуры образцов проводилось цифровым термометром «CENTER-314» с периодом 30 мин в трех точках (рисунок 4.2). Отбор проб и определение влажности (W, %) осуществлялись согласно ГОСТ 5180-2015 [28].



образцов различной влажности (льдистости) по формуле:  $V = \frac{2S}{t}$ , где  $t$  – время регистрации отраженного сигнала от задней поверхности образца (нс);  $s$  – ширина образца (м). По результатам расчетов, представленных на рисунке 4.3 в виде графиков, можно выделить три участка с диапазоном изменений температур: **1** – от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-3,5^{\circ}\text{C}$ ; **2** – от  $-3,5^{\circ}\text{C}$  до  $+1^{\circ}\text{C}$ ; **3** – от  $+1^{\circ}\text{C}$  до  $+15^{\circ}\text{C}$ .

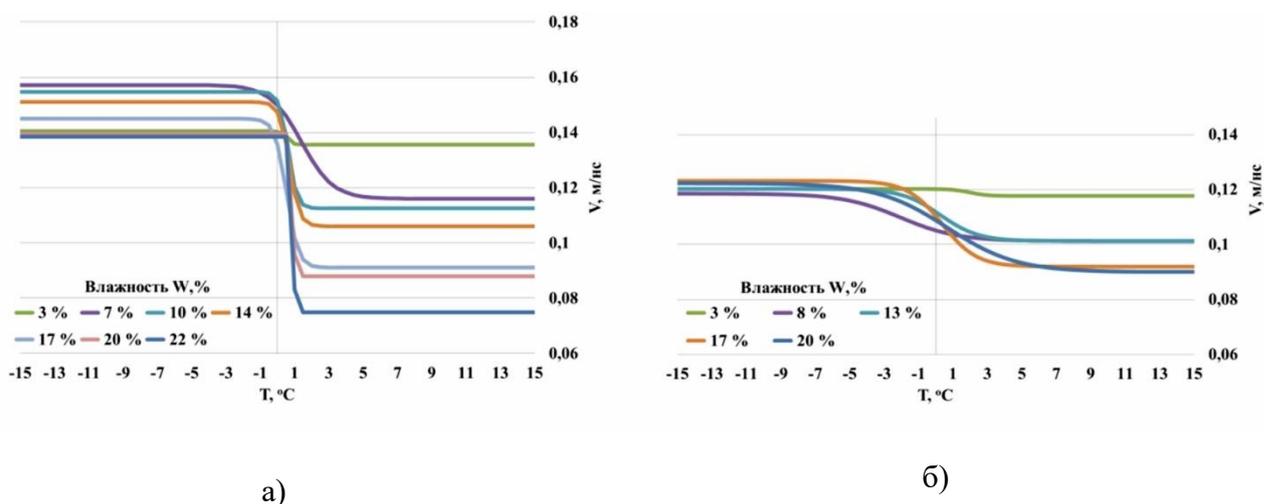


Рисунок 4.3 – Зависимости скорости распространения ( $V$ , м/нс) георадиолокационных сигналов от влажности (%) и температуры ( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) горных пород при их оттайке:

а) кварцевый песок; б) горный песок

Как видно из графиков, на первом участке, в интервале температур от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-3,5^{\circ}\text{C}$ , скорости распространения георадиолокационных сигналов снижаются с увеличением влажности пород: в кварцевом песке от  $0,158$  м/нс до  $0,133$  м/нс при влажности от 3% до 22%, в горном песке от  $0,125$  м/нс до  $0,118$  м/нс при влажности от 3% до 20%. Снижение скорости распространения георадиолокационных сигналов в горной породе с увеличением их влажности (льдистости) при отрицательной температуре связано с возникновением криогенной системы пор и макродипольной поляризацией, что увеличивает действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) исследуемых образцов. На втором участке, в пределах от  $-3,5^{\circ}\text{C}$  до  $+1^{\circ}\text{C}$ , происходит резкое уменьшение скоростей пропорционально значению влажности. Это связано с повышением количества незамерзшей воды в породе. На третьем участке в интервале температур от  $+1^{\circ}\text{C}$  до  $+15^{\circ}\text{C}$ , с увеличением влажности значения скоростей

сигналов в кварцевом песке снижаются с 0,136 м/нс (при  $W=3\%$ ) до 0,074 м/нс (при  $W=22\%$ ), в горном песке с 0,118 м/нс (при  $W=3\%$ ) до 0,089 м/нс (при  $W=20\%$ ).

Величина снижения скорости распространения георадиолокационного сигнала в образце горной породы, находящемся в талом состоянии по сравнению с мерзлым, в большей степени зависит от влажности образца. При влажности  $W=3\%$  образцов кварцевого песка разница в скоростях распространения сигнала в образцах, находящихся в талом и мерзлом состояниях составляет  $\Delta V=4\%$  (от 0,140 м/нс до 0,135 м/нс). При последующем увлажнении эта разница значительно увеличивается, и при влажности  $W=22\%$  (рисунок 4.3а) снижение скорости достигает 46% (от 0,138 м/нс до 0,075 м/нс). В мерзлом горном песке при начальной влажности также наблюдается небольшое снижение скорости сигнала ( $\Delta V \approx 4\%$ ), но уже при влажности  $W=8\%$  оно составляет около 10%, что является достаточным для оценки значений влажности породы по разнице скоростей в мерзлом и талом состояниях. При увеличении влажности горного песка до  $W=20\%$  скорость распространения георадиолокационного сигнала снизилась на 32% (рисунок 4.3б).

В результате проведенных экспериментальных георадиолокационных исследований мерзлых дисперсных горных пород, характерных для четвертичных отложений Центральной Якутии, с влажностью от 3% до 22% определены закономерности динамики скорости распространения ( $V$ , м/нс) георадиолокационного сигнала в мерзлых породах при их оттайке. Установлено, что для пород с влажностью  $W \geq 7\%$  значения  $V$  при полной заморозке и оттайке различаются на 10-46%, что достаточно для мониторинга изменения влажности по времени задержки сигналов, полученных по результатам разносезонных (весна-осень) георадиолокационных измерений.

Далее рассчитаны скорость распространения электромагнитной волны в породах с различной влажностью и ее относительное изменение  $N_V$  в их талом и мерзлом состоянии по выражению:

$$N_V = \frac{(v_m - v_m)}{v_m} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

где  $v_m$  – максимальная скорость распространения электромагнитных волн в горной породе, т.е. скорость, определенная в период полного промерзания (0,150 м/нс);  $v_m$  – скорость распространения электромагнитных волн в период оттайки пород.

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

$$N_v = 1,55W + c \quad (4.2)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава горной породы. Данная формула позволяет получать корректные результаты расчетов при влажности пород выше 7%. Так, для горного песка коэффициент  $c$  определен значением 0,3, а для кварцевого – 11.

Выполнены экспериментальные исследования по апробации данной зависимости в натуральных условиях на двух объектах: вторая терраса долины Туймаада и массив вскрышных пород Кангаласского угольного разреза.

Образцы второй террасы долины Туймаада получены вдоль Федеральной автомобильной дороги А331 «Виллой» в черте г. Якутска по 6 скважинам. Для рассмотрения выбраны значения влажности с 1 и 2 м по глубине (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Влажность образцов горных пород второй террасы долины Туймаада по данным бурения

Глубина	Скв. 1	Скв. 2	Скв. 3	Скв. 4	Скв. 5	Скв. 6
Н, м	W, %					
1,0	6,10	46,78	12,13	14,28	4,68	16,02
2,0	13,19	24,03	10,75	15,42	24,80	19,32

Для построения графиков зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитных волн от влажности выполнен пересчет на средневзвешенную влажность по глубине  $W_{cp}$ . Пересчет связан с тем, что распространение электромагнитных волн георадара происходит по всей толще породы, до определенной глубины, при этом они претерпевают замедления скорости в зависимости от влажности пород. За опорную границу, по которой рассчитано относительное изменение скорости электромагнитных волн, принята кровля многолетнемерзлых пород на глубине 2 м. На рисунке 4.4 приведено

сопоставление теоретических расчетов по формуле (2) ( $N_{\text{врасч}}(W)$ ) с расчетами на основе экспериментальных данных по формуле (1) ( $N_{\text{вэксп}}(W)$ ).

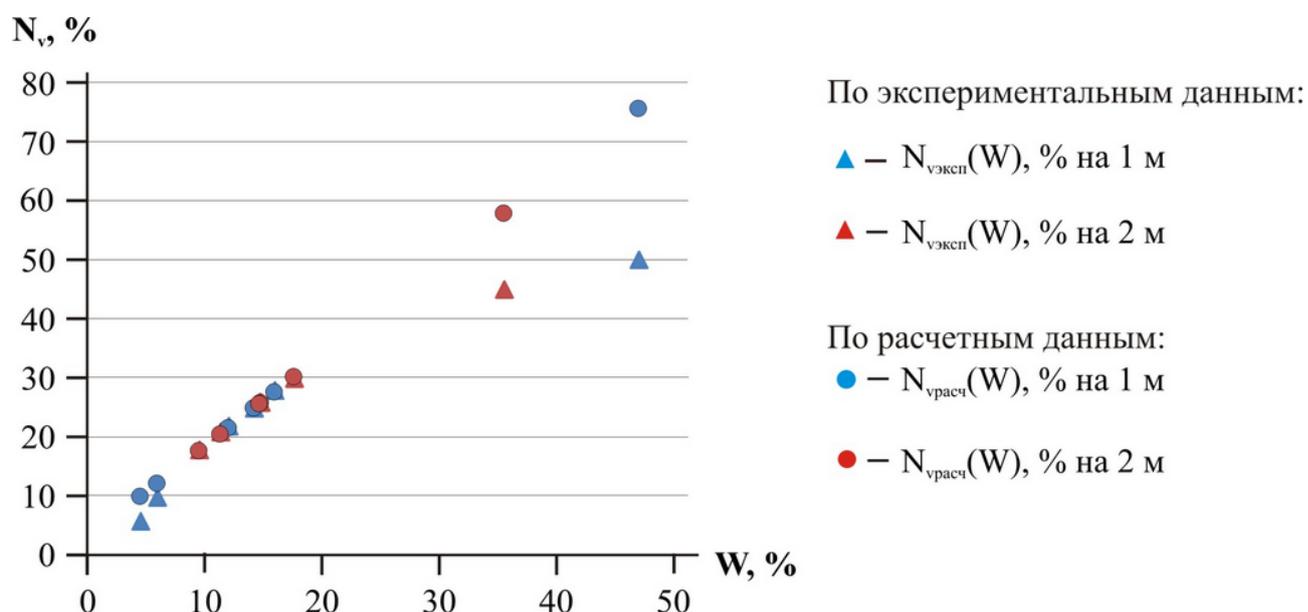


Рисунок 4.4 – Экспериментальные и расчетные зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны ( $N_v$ ) от влажности ( $W$ ) горных пород второй террасы долины Туймаада

Коэффициент  $c$  характеризует горные породы, слагающие исследуемый участок, и равен 2,8. В целом, отмечается достаточно равномерное распределение значений в диапазоне 7-25 %, разброс имеется при малой влажности – до 7% и при большой – более 25 %. Т.е. полученный результат вписывается в граничные условия применимости предложенной формулы от 7 до 25 %.

Данные георадиолокации и образцы горных пород со второго объекта получены в летний период, с июля по август, на участке угольного разреза «Кангаласский», расположенного в 45 км к северу от г. Якутска. Георадиолокация выполнена методикой профилирования, антенным блоком АБ-400 по вскрышным породам угольного разреза. Контрольные скважины для определения влажности пробурены в трех точках до глубины 1,8 м, в начале, середине и конце георадиолокационного профиля. Образцы были взяты на глубинах 0,5 м, 1 м, 1,5 м и 1,8 м. По ним в лаборатории определены весовые влажности каждой пробы, а затем средние значения влажностей ( $W_{cp}$ ) в каждой скважине. Для примера в таблице 4.2 приведены данные в точке наблюдений №2, с середины профиля.

Таблица 4.2 – Данные по влажности горных пород в точке наблюдений №2 (угольный разрез «Кангаласский»)

№ Скви.	Дата	Глубина скважины, м				
		0,5	1	1,5	1,8	до 1,8
		W, %	W, %	W, %	W, %	W <sub>ср</sub> , %
1	19.07	-	7,79	7,3	20,88	11,99
2	28.07	-	6,98	-	16,77	11,87
3	03.08	7,29	7,21	8,49	11,89	8,72
4	19.08	6,45	7,76	7,45	7,67	7,33
5	22.08	6,68	10,21	9,25	11,65	9,45
6	24.08	7,26	7,53	7,07	7,65	7,38
7	26.08	6,99	6,53	7,64	12,1	8,31
8	31.08	6,23	7,37	9,3	12,61	8,88

Даты измерений выбраны исходя из погодных условий, т.е. после атмосферных осадков, для того чтобы зафиксировать максимальные изменения влажности пород. При взятии проб установлено, что на отметке 1,8 м начинает увеличиваться влажность пород. Этот рост продолжается до кровли глинистых мерзлых пород.

Для анализа выбран диапазон данных, соответствующих талым породам в окрестности точки наблюдений №2, с 19 июля по 31 августа. По среднему значению времени задержки сигнала, определенному по трем точкам георадиолокационных зондирований, и глубине до отражающего слоя в этом месте, определена скорость распространения электромагнитных волн. Относительное изменение скорости определяется по выражению (4.1). Максимальная скорость распространения электромагнитных волн ( $v_m$ ) в горной породе, определенная в период полного промерзания (0,120 м/нс для данного участка);  $v_m$  – определяется в произвольный момент времени, в течение года, предполагается, что в период оттайки пород.

Сопоставление расчетных значений по формуле (4.2) с экспериментальными по формуле (4.1) выполнено при коэффициенте  $c=6,4$ , характеризующем горные породы, слагающие исследуемый участок.

На рисунке 4.5 показаны экспериментальные значения  $N_v$  в диапазоне влажности 7-25 % и соответствующие определенным образцам кривые аппроксимации с коэффициентами  $c$ . Поскольку породы Кангаласского угольного разреза и 2-ой террасы долины Туймаада представлены различными песками и

суглинками, то значения  $N_v$  для них расположились между лабораторными данными по кварцевому и горному песку.

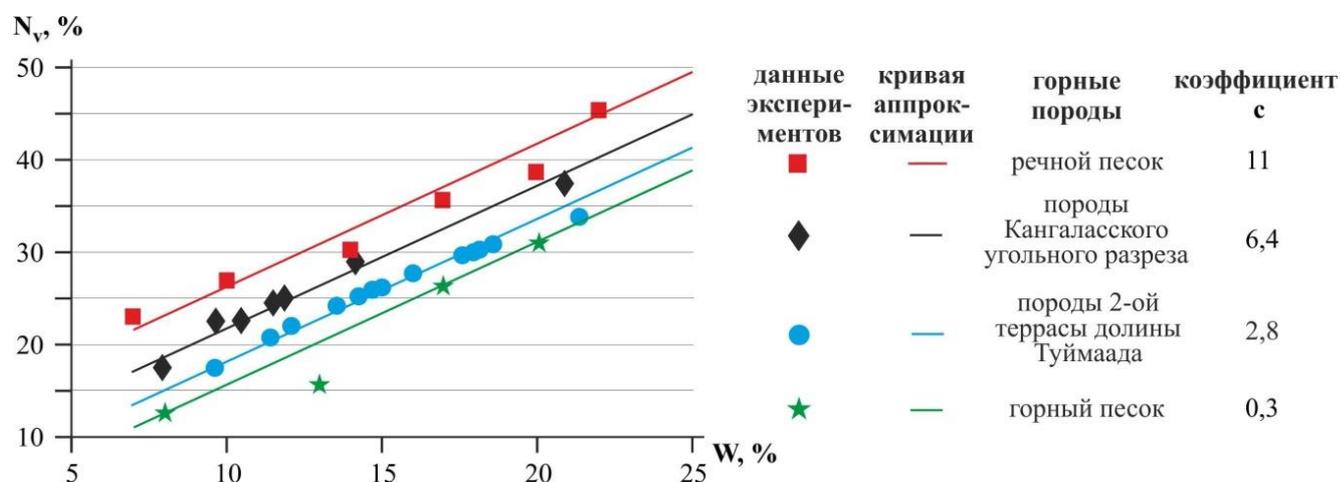


Рисунок 4.5 – Зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны ( $N_v$ ) от вещественного состава и влажности ( $W$ ) горных пород

Экспериментальными георадиолокационными исследованиями дисперсных горных пород установлены зависимости относительного снижения  $N_v = \frac{V_M - V_T}{V_M} \cdot 100\%$  скорости распространения высокочастотной электромагнитной волны в породах в талом состоянии ( $V_T$ ), по сравнению с мерзлым ( $V_M$ ), от их влажности ( $W$ , %) в диапазоне 7-25%, аппроксимируемые формулой  $N_v = 1,55W + c$ , где  $c$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава горной породы.

Таким образом, разработанная модель связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности горных пород ( $7\% < W < 25\%$ ), описываемая эмпирической формулой, учитывает криогенное состояние и вещественный состав горных пород, тем самым может быть использована для разработки технологии георадиолокационного мониторинга влажности горных пород в пределах деятельного слоя.

## 4.2 Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород

В пределах деятельного слоя сезонных колебаний температуры в толще многолетнемерзлых пород наблюдаются интенсивные изменения их влажности и прочности. Эти параметры оказывают существенное влияние на строительство гидротехнических сооружений, таких как водоподпорные плотины и дражные котлованы, а также при разведке россыпей, залегающих в обводненных породах, для контроля мощности зоны промерзания [103]. Как известно, физико-механические свойства мерзлых дисперсных горных пород зависят от влажности (льдистости) и температуры [22, 178]. При разовых измерениях их значений в отдельных точках, могут быть пропущены или не обнаружены зоны дренирования, застоя воды, деградиационные процессы в дамбах, бортах и кровле горных выработок. Наблюдения методом георадиолокации за изменением влажности горных пород возможны в диапазоне 5-70% [178], что позволит получать непрерывные данные на протяженных участках, проясняя, в отдельных случаях, их криогенное состояние [147, 170, 173, 206].

В настоящее время, чтобы получить информацию о строении горных пород и их гидрогеологическом состоянии применяется дорогостоящий разрушающий метод бурения. Однако стремительное развитие георадиолокации направлено к ее вовлечению в комплексное изучение геосред. Так, изучая их геологическое строение, попутно решается задача определения влажности [222, 229, 231, 233, 234, 237].

Как отмечается в работе Владова М.Л. и Старовойтова А.В. (2004) в диапазоне метровых волн действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  грунтов, а, следовательно, и скорость распространения электромагнитных волн  $v$ , очень сильно зависят от их влажности  $W$  (где  $W$  - весовая влажность). Скорость и действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости связаны простым соотношением:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (4.3)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме,  $\varepsilon'$  - действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды,  $v$  - скорость распространения электромагнитных импульсов в среде [17], которая определяется по данным о времени прохождения отраженной волны. Согласно J. Huisman оценка содержания воды в почве основана на времени задержки сигнала. Для его регистрации может быть использовано отражение от рассеивающих подповерхностных объектов, либо отражение от геологических границ, полученное посредством разноса антенн [218].

Для перехода от значений  $W$  к значениям  $\varepsilon'$  существует целый ряд эмпирических формул [17].

Для песков и суглинков:

$$\varepsilon' = 3,2 + 1,1W \quad (4.4)$$

Для осадочных пород в широком диапазоне изменения влажности 3-45%:

$$\varepsilon' = 3,03 + 9,3W_{\text{ОБ}} + 146W_{\text{ОБ}}^2 - 76,7W_{\text{ОБ}}^3 \quad (4.5)$$

где  $W_{\text{ОБ}}$  - объемная влажность.

Для сред с большой влажностью Владовым М.Л. и Старовойтовым А.В. (2004) предложена зависимость [17]:

$$\varepsilon' = 720/(180 - W) \quad (4.6)$$

Наиболее часто используемая в зарубежной литературе зависимость, между диэлектрической проницаемостью ( $\varepsilon'$ ) и объемным содержанием воды в почве ( $\theta$ ), была предложена [251]:

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2}\varepsilon' - 5,5 \times 10^{-4}\varepsilon'^2 + 4,3 \times 10^{-6}\varepsilon'^3 \quad (4.7)$$

Она получена эмпирически для минеральных почв с различной структурой [251].

Более простое соотношение содержания воды в почве и диэлектрической проницаемости предложили Ledieu et al. [232] и Herkelrath et al. [215]:

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon'_b} - b \quad (4.8)$$

где  $a$  и  $b$  - параметры калибровки,  $\sqrt{\varepsilon'_b}$  - показатель преломления [215, 232].

На практике, приведенные соотношения имеют определенные погрешности, из-за неконтролируемого изменения волновых характеристик по площади и глубине. Так, в работе Нерадовского Л.Г. (2013) [81] отмечается, что разброс ошибок определения значений  $W_{ob}$  по отношению к лабораторным данным составляет в относительной метрике 19%. Для расчетов при определении влажности им предложено двумерное уравнение линейной регрессии:

$$W_{ob} = -11 + 690V - 16,5G \quad (4.9)$$

где  $W_{ob}$  – средневзвешенное значение суммарной объёмной влажности (льдистости) мёрзлого массива грунтов в процентах до глубины 10-13 м;  $V$  (м/нс) и  $G$  (дБ/м) – средневзвешенные значения скорости и затухания по всему разрезу до глубины 10-13 м [81].

Для оценки влажности дисперсных горных пород Центральной Якутии проведены экспериментальные исследования в лабораторных и натуральных условиях. Во время оттайки георадиолокацией обследовались разноувлажненные замороженные образцы горного и кварцевого песка (Раздел 4.1). В результате выполненных работ предложен способ оценки влажности дисперсных горных пород по эмпирической формуле, основанной на определении относительного изменения времени задержки ( $N_t$ ) георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в талом ( $t_T$ , нс) и мерзлом ( $t_M$ , нс) состоянии [164]:

$$W = 0,65N_t - a, \quad (4.10)$$

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

$$N_t = \frac{(t_T - t_M)}{t_T} \cdot 100\%, \quad (4.11)$$

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

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

рыхлых отложений Центральной Якутии принимает минимальное значение по всей толще пород и находится в пределах 4-9 [85]. Т.е. такое состояние условно можно принять как не содержащее влаги (нулевое содержание именно в жидкой фазе). В тот момент, когда породы начинают оттаивать, появляется вода - время задержки сигналов увеличивается. Следовательно, используя разницу между временем задержки сигналов в породах в талом и мерзлом состоянии, можно оценить их влажность. Применительно к данному способу разработана методика оценки средней весовой влажности рыхлых осадочных горных пород в диапазоне  $7\% < W < 25\%$ . Пределы определяемой влажности установлены при анализе лабораторных данных. Материалы, по которым определена влажность пород, получены в результате апробации методики в натуральных условиях на объектах: участок термометрических наблюдений и отрезок дороги «Вилуйский тракт» г. Якутска (Центральная Якутия).

Методика включает следующие этапы:

- проведение георадиолокационных измерений массива горных пород в мерзлом и талом состоянии;
- контрольное бурение с взятием проб влажности, для определения коэффициента  $a$ ;
- расчет относительного изменения времени задержки георадиолокационных сигналов по выражению (4.11);
- расчет средней весовой влажности пород по формуле (4.10) с учетом их вещественного состава по коэффициенту  $a$ ;
- визуализация результатов расчета влажности вдоль профиля георадиолокационного разреза исследуемого слоя горного массива.

Для определения влажности методика подразумевает бурение в одной контрольной точке для последующего расчета коэффициента  $a$ . Этот пункт позволяет существенно повысить достоверность данных. Однако при невозможности бурения, коэффициент  $a$  задается в зависимости от вещественного состава пород, численно из диапазона, который определен экспериментально (от 0,1 до 8). На данный момент лабораторные эксперименты выполнены лишь на двух

образцах горных пород: горный песок ( $a=0,1$ ) и кварцевый песок ( $a=6,8$ ), а апробация на двух участках со смешанным составом ( $a=1,1$  и  $a=8$ ). В связи с этим бурение все же остается важным этапом ведения работ при определении влажности по предложенной методике на новых участках [151].

На первом участке апробации георадиолокационные наблюдения выполнялись в окрестности термометрической скважины в период с мая по декабрь, что позволило охватить тепловой режим горных пород от положительных до отрицательных температур (от 11,61 до -5,74 °С). По участку исследований данные получены методикой профилирования, георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-400. Температура определена по 6 датчикам (термокоса), в пределах глубин от 0,05 до 2,75 м. Пробы для определения весовой влажности взяты из скважин контрольного бурения в июле: на глубине 1 м – 7,87% (Скв. 1) и 6,98% (Скв. 2), на глубине 1,8 м – 14,19% (Скв. 1) и 16,77% (Скв. 2).

В процессе бурения замечено, что на отметке 1,7 м начинается резкое увлажнение пород, которое продолжается до глубины 1,9 м, до многолетней мерзлоты, являющейся в данном случае водоупором. В качестве опорной границы выбрано отражение от кровли влажного слоя на глубине 1,8 м, залегающего на многолетнемерзлых породах.

Для анализа и построения графиков выбран диапазон данных с 16 мая по 22 октября, соответствующих талым породам на глубине 0,95 м в окрестности скважины. Столь значительная глубина протайки в мае связана с тем, что на поверхности скважина не имеет термоизоляции, и расположена на открытом высоком месте, подверженном интенсивной инсоляции. Следующий температурный датчик расположен на глубине 1,95 и уже находится в граничной зоне многолетнемерзлых пород.

Значения данных выбраны с отрезка профиля, в окрестности Скв. 1. По трем соседним точкам зондирования рассчитано среднее значение времени задержки сигнала от опорной границы на глубине 1,7 м. Оценено относительное изменение времени задержки сигналов  $N_i$  по формуле (4.11). Далее, на основе данных по влажности при контрольном бурении определяется коэффициент  $a$  (в данном

случае  $a=1,1$ ), что позволяет вычислить среднюю весовую влажность для нашего случая по обобщенной формуле (4.10). Результаты расчетов по объекту представлены на рисунке 4.6 совместно с данными лабораторных исследований по горному ( $a=0,1$ ) и кварцевому песку ( $a=6,8$ ).

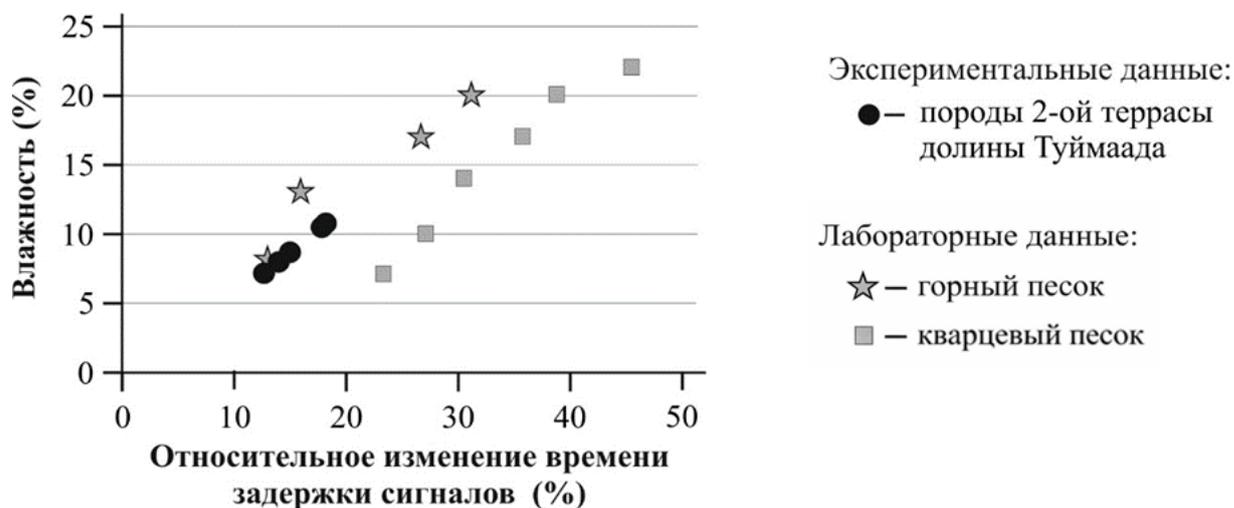


Рисунок 4.6 – Результаты применения методики оценки влажности горных пород в естественном залегании и в лабораторных условиях

Второй участок апробации предложенной методики оценки влажности пород расположен на отрезке дороги «Вилуйский тракт» протяженностью 1,3 км. Данные георадиолокации получены в период полного промерзания пород и в период оттайки (рисунок 4.7а). Распределение влажности вдоль профиля георадиолокационного разреза, в изучаемом слое горных пород, определяется по формуле (8) во всех точках зондирования с учетом установленных закономерностей (рисунок 4.7б).

Как показывает опыт инженерно-геологических изысканий развитие неразрушающего контроля и определения свойств горных пород весьма актуально и востребовано в различных промышленных и сельскохозяйственных отраслях. Применение предложенной методики возможно для дистанционной оценки влажности дисперсных горных пород, грунтовых оснований инженерно-технических сооружений. По результатам апробации установлено, что использование в качестве опорной отражающей границы слоя сезонного протаивания в толще многолетней мерзлоты обеспечивает высококонтрастные

сигналы на радарограмме. При этом методика позволяет вести наблюдения за изменением влажности в породах под воздействием различных природно-климатических и техногенных факторов в пределах деятельного слоя горного массива криолитозоны [151].

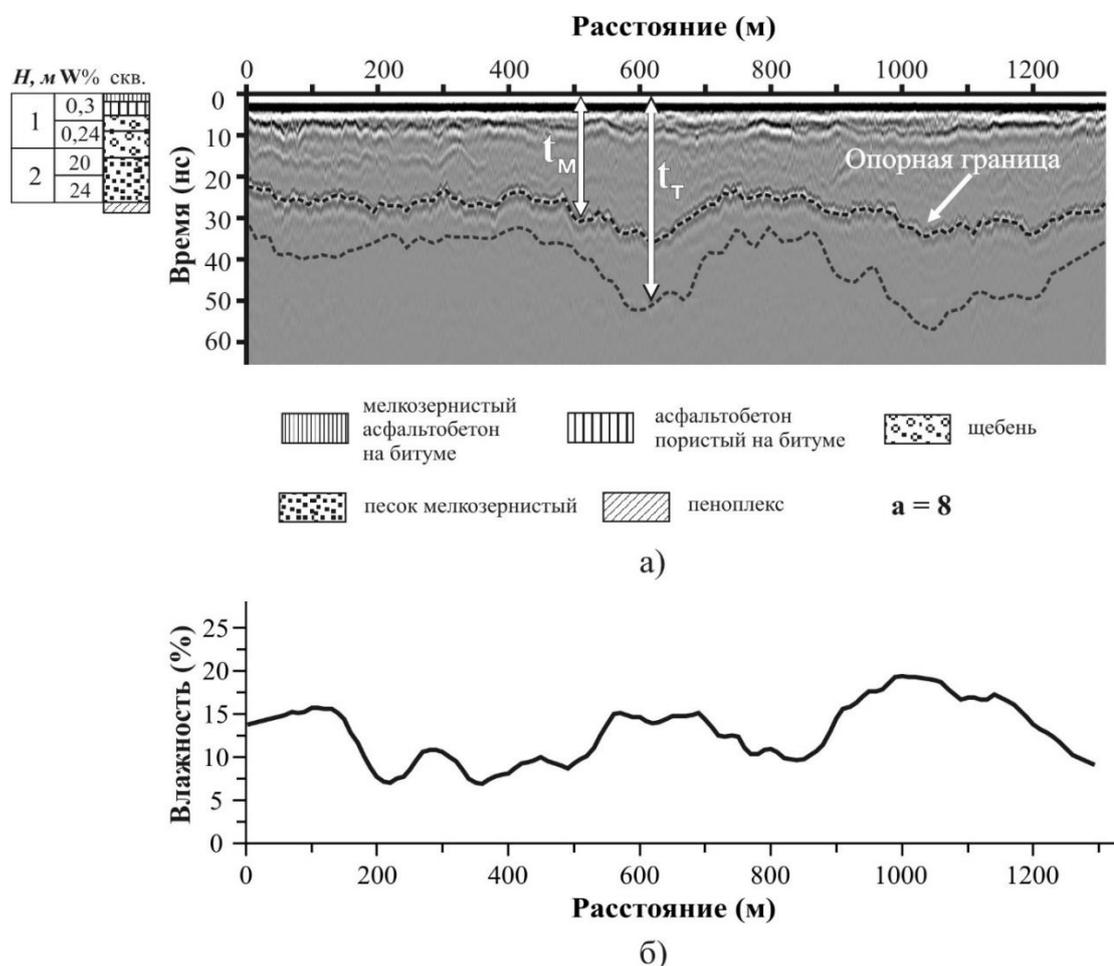


Рисунок 4.7 – Пример оценки влажности грунтов основания автомобильной дороги методом георадиолокации (Вилуйский тракт, г. Якутск):

- а) выделение опорной границы в мерзлом ( $t_M$ ) и талом ( $t_T$ ) состоянии массива горных пород на георадиолокационном разрезе;
- б) результаты расчета средней весовой влажности вдоль профиля георадиолокационного разреза исследуемого слоя горных пород

### 4.3 Программное обеспечение методики георадиолокационной оценки изменения влажности горных пород

Картирование распределения влажности возможно с помощью специализированных алгоритмов обработки данных и программно-методического обеспечения георадиолокации. Разработанное программное обеспечение состоит из двух блоков (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Блок-схема программно-методического комплекса

Первый блок позволяет выделять локальные неоднородности по представленному выше алгоритму. Второй блок реализует методику оценки влажности грунтов на основе разносезонных георадиолокационных измерений.

Апробация разработанной методики георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород проведена в натуральных условиях на дамбе, в пределах Кангаласского угольного разреза (микрорайон Кангалассы, г. Якутск, Республика Саха (Якутия). Дамба сооружена на участке ведения вскрышных работ и защищает карьер от поверхностных вод.

Мониторинговые георадиолокационные измерения выполнены георадаром с центральной частотой 400 МГц в апреле и сентябре 2017 г. (рисунок 4.9). Согласно методике по результатам весенних и летних измерений выбрана опорная геологическая граница в виде осей синфазности георадиолокационных сигналов (рисунок 4.10). Опорные скважины (скв.1 и скв.3) для определения расчетного коэффициента  $\alpha$  установлены на расстоянии 76 м и 161 м по профилю. Влажности

определены по пробам термостатно-весовым способом через 0,3 м и приведены на рисунок 4.10.



а) б)  
Рисунок 4.9 – Участок георадиолокационных исследований по апробации программно-методического обеспечения: а) апрель; б) сентябрь

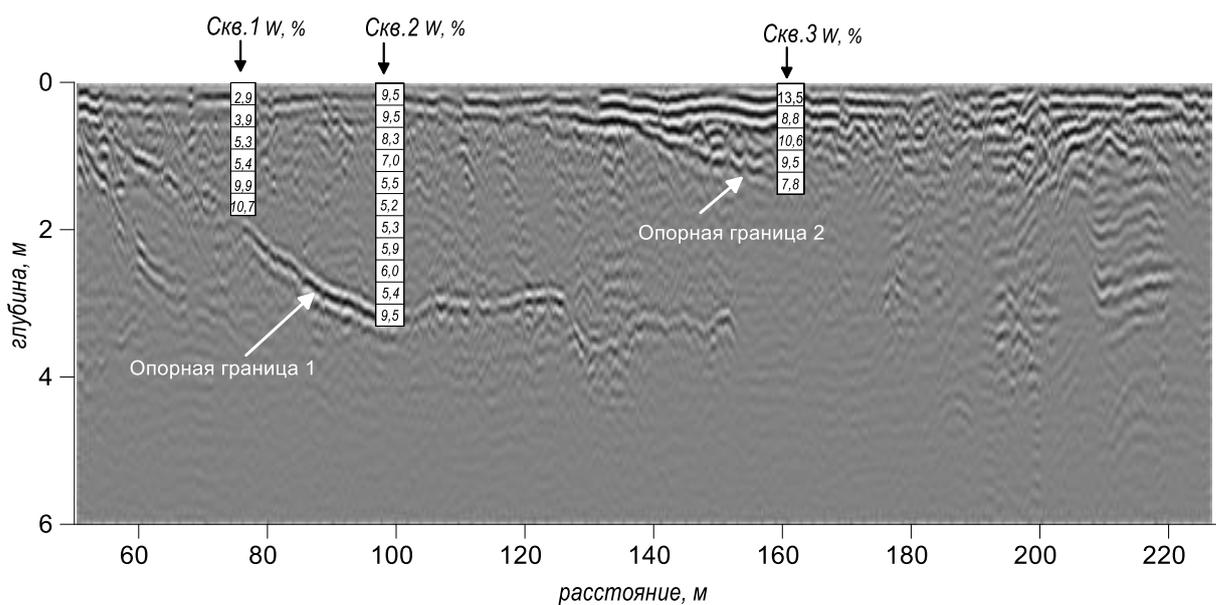


Рисунок 4.10 – Выбор опорной границы на георадиолокационном разрезе и расстановка скважин

Разработанная методика эффективна при влажности горных пород более 7% [110]. Ввиду того, что влажность в Скв.1 на глубине от 1,5 до 3 м составила около 5,5%, расчет средней влажности ( $W_{cp}$ ) по скважине произведен по значениям более 7%. Таким образом, для Скв. 1 средняя влажность составила 8,79%.

Согласно методике [110, 129], по значениям относительного изменения времени задержки сигналов при оттайке пород ( $N_t = 100\% * (t_m - t_M) / t_M$ , где  $t_M$  – время

задержки сигналов для пород в мерзлом состоянии;  $t_m$  – время задержки сигналов для пород в талом состоянии), и средней влажности ( $W_{cp}$  – по данным скважины) определен коэффициент  $a$ , зависящий от вещественного состава горной породы:

$$a=0,65 \cdot N_t - W_{cp}.$$

Для скв.1 получено значение  $a=7,2$ .

Сопоставление данных бурения и результатов интерпретации георадиолокационного зондирования тела дамбы показало, что ее отсыпка производилась в несколько этапов различными горными породами [161]. Так как разрез неоднороден по составу, то коэффициент вещественного состава горной породы ( $a$ ) может изменяться, как по глубине, так и по расстоянию. Поэтому в разрезе определены две опорные границы, для каждой из которых определено значение коэффициента  $a$  (для скв.1  $a=7,2$ , для скв.3  $a=5,7$ ).

Для оценки влажности горных пород в автоматическом режиме на тестовом участке, в базу данных загружались георадиолокационные разрезы весенних (полное промерзание) и летних (частичное оттаивание деятельного слоя) измерений с опорной геологической границей в виде осей синфазности сигналов (рисунок 4.11а). Для определения их времени задержки ( $t_m$ ) и ( $t_m$ ) использована специальная процедура обработки, основанная на расчете коэффициента корреляции амплитудно-временных характеристик сигналов в соседних точках зондирования профиля [151, 164]. Выбранные времена задержки сохранены в два файла (для весенних и летних данных). Далее по методике [110, 129] произведен расчет влажности горных пород по формуле  $W=0,65 \cdot N_t - a$ .

Построены графики влажности по профилю, полученные по данным в июле и в сентябре (рисунок 4.11б). Контрольная скважина (скв.2) пробурена на отметке 98 м по профилю до глубины 3,4 м (рисунок 4.11а).

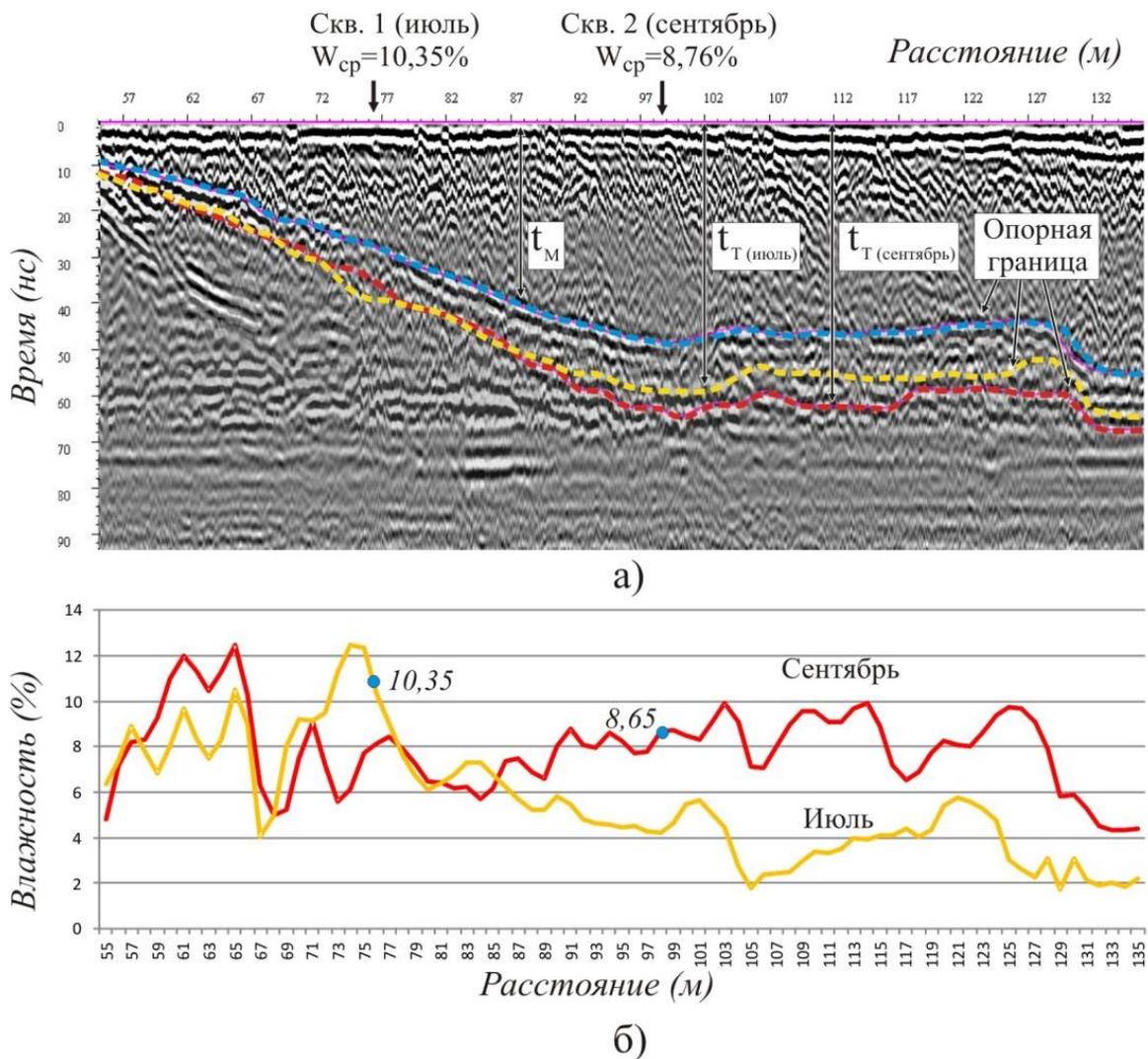


Рисунок 4.11 – Пример оценки влажности грунтов основания защитной дамбы Кангаласского угольного разреза (микрорайон Кангалассы, г. Якутск)

- а) георадиолокационный разрез, на котором представлены результаты выделения опорной границы в мерзлом ( $t_M$ ) и талом ( $t_T$ ) состоянии массива горных пород;
- б) результаты расчета средней весовой влажности ( $W_{cp}$ , %) вдоль профиля георадиолокационного разреза исследуемого слоя горных пород

Образцы горных пород взяты через каждые 0,3 м и для каждого из них в лаборатории определены весовые влажности, а затем рассчитано среднее значение ( $W_{cp}$ ). В результате средняя весовая влажность в точке бурения по данным лабораторных исследований составила 8,79 %, по данным георадиолокации 8,65%.

## Выводы к главе 4

Экспериментальными георадиолокационными исследованиями дисперсных горных пород установлены зависимости относительного снижения скорости распространения высокочастотной электромагнитной волны в породах в талом состоянии по сравнению с мерзлым, от их влажности ( $W$ , %) в диапазоне 7-25%, аппроксимируемые формулой  $N_v = 1,55 \cdot W + c$ , где  $c$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава горной породы. Данная разработанная модель связи скорости распространения электромагнитной волны и влажности горных пород, описываемая эмпирической формулой, учитывает криогенное состояние и вещественный состав горных пород.

Предложен способ оценки влажности дисперсных горных пород по эмпирической формуле, основанной на определении относительного изменения времени задержки ( $Nt$ ) георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в талом и мерзлом состоянии, по формуле:  $W = 0,65Nt - a$ , где  $W$  – влажность;  $a$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава исследуемых горных пород;  $Nt$  – относительная разница времени задержки сигналов для пород в мерзлом и в талом состоянии.

Для оценки влажности дисперсных горных пород, грунтовых оснований инженерно-технических сооружений разработана методика разносезонных измерений (в периоды полного промерзания и полной оттайки пород), результаты которых позволяют на основе анализа изменений кинематических характеристик георадиолокационных сигналов, отраженных от опорной границы, оценить весовую влажность пород перекрывающих эту границу. За опорную границу предложено принимать технологические границы сооружения, глубина расположения которых известны. Например, границу основания грунтовой отсыпки.

## **ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО МАССИВА**

### **5.1 Методика георадиолокационных измерений при исследовании строения массива мерзлых горных пород россыпных месторождений**

На настоящем этапе развития метода георадиолокации, наиболее убедительные результаты получают при решении задач изучения геометрии геологических разрезов. Специализированные процедуры обработки данных измерений позволяют делать послойные пересчеты скоростей, для повышения точности масштабирования георадиолокационных разрезов по глубине, при этом учитывается влияние рельефа профиля и GPS привязка точек измерений. Для эффективного применения георадиолокационного метода в комплексе инженерно-геологических исследований в криолитозоне [62, 82, 127, 128, 133] необходимо постоянное совершенствование методической базы, что наглядно подтвердил анализ полученных к настоящему времени результатов применения георадиолокации при исследовании массивов многолетнемерзлых горных пород и грунтов.

На настоящем этапе развития метода георадиолокации, наиболее убедительные результаты получают при решении задач изучения геометрии геологических разрезов. Специализированные процедуры обработки данных измерений [17] позволяют делать послойные пересчеты скоростей, для повышения точности масштабирования георадиолокационных разрезов по глубине, при этом учитывается влияние рельефа профиля и GPS привязка точек измерений. Высокая оперативность измерений и процесса обработки данных, в сочетании с незначительными трудозатратами, делают георадиолокацию достаточно эффективным методом детального изучения верхней части геологического разреза.

Правильно выбранная на основании предварительных расчетов методика георадиолокационных измерений направлена на обеспечение оптимизации глубинности и разрешающей способности работ [130].

Неправильная методика снижает качество георадиолокационных данных и может привести к невозможности решения поставленной задачи даже при тщательно проведенной обработке.

### **5.1.1 Георадиолокационная аппаратура. Параметры измерений.**

#### *Выбор эффективной частоты спектра зондирующего сигнала.*

При георадиолокационных зондированиях массива горных пород исследуемая среда выступает как фильтр, где с глубиной более высокие частоты затухают более интенсивно, чем низкие, которые распространяются на большую глубину. Расширение спектра частот повышает разрешающую способность георадара, но одновременно ухудшается энергетика. Кроме этого, расширение полосы частот связано с трудностями технологической реализации антенн и приемопередающего тракта.

Обычно глубину георадиолокации увеличивают за счет снижения частоты, однако это неизбежно ухудшает разрешающую способность. Чтобы эффективно совместить глубину и детальность, предлагается использовать двухчастотное зондирование. Для глубокого изучения массива применяются антенны с частотой от 30 до 250 МГц, а для выявления мелких объектов — от 250 до 400 МГц. В типовых условиях при сопротивлении пород 150–300 Ом·м использование частот 50–100 МГц позволяет достичь глубины 12–15 метров с точностью около 1 метра, что оптимально для большинства инженерно-геологических задач.

Для работы на россыпных месторождениях в весенне-осенний период рекомендовано оборудование, указанное в таблице 5.1. Эти рекомендации основаны как на заводских характеристиках серии «ОКО» [104], так и на реальном опыте измерений. Стоит учитывать, что состояние почвы сильно влияет на результат. Например, на мерзлых грунтах сигналы поглощаются намного слабее, благодаря чему глубина сканирования увеличивается в среднем в полтора раза.

Таблица 5.1 – Рекомендуемая аппаратура для исследований пород криолитозоны

Требуемая глубина, м		Антенный блок	Режим съемки
До 5 м	Осень	АБ-400, 250	непрерывный, дискретный
	Весна	АБ-500, 400	
До 8 м	Осень	АБ-250, 150	
	Весна	АБ-400, 250	
Свыше 8 м	Осень	АБ-150, 90	
		АБДЛ-100, 30-50	
	Весна	АБ-250, 150, 90 АБДЛ-100, 50	

Важно также учитывать сезонный фактор: летом появление талого слоя резко повышает проводимость пород, что приводит к сильному затуханию амплитуды сигналов. Поэтому георадиолокационные исследования предпочтительнее проводить в зимний период. В это время года поглощение электромагнитных волн минимально, что создает оптимальные условия для получения качественных данных и достижения максимальной глубины зондирования.

Для работы на пересеченной местности целесообразно использовать гибкие линейные антенны типа АБДЛ-Тритон, которые позволяют проводить измерения как в дискретном, так и в непрерывном режимах. Основным их недостатком является отсутствие экранирования: излучение направлено в том числе в верхнюю полусферу, что создает сигналы-помехи от деревьев, машин или горной техники. Однако в условиях большинства россыпных месторождений Якутии, где подобных объектов немного, этот недостаток практически не влияет на качество получаемых результатов.

Анализируя россыпи Якутии, можно сразу исключить месторождения, на которых георадиолокационная съемка не даст положительных результатов. К таким месторождениям относятся россыпи, толщина рыхлых отложений которых составляет более 25 м, и те, в которых велико содержание глин. Учитывая данные условия, можно отобрать наиболее подходящие месторождения, на которых можно получить качественные результаты георадиолокационной съемки. По глубине залегания плотика можно разделить россыпи на 4 группы, для каждой из которых подойдет отдельный антенный блок георадара:

Для месторождений с глубиной залегания рыхлых отложений до 5 метров рекомендуется использовать антенный блок с частотой 400 МГц. К этой категории относятся объекты «Улахан Батор» (Усть-Янский район), «Игорь» (Верхоянский) и «Бурый Икар» (Момский). В Алданском районе к этой категории относятся «Крутой», «Правый Нимгер», «Сланцевый», «Перебуторный», «Тохто», «Джекконда» и «Вертинский», а также «Аллах-Юнь» в Усть-Майском районе и нерюнгринские месторождения «Усть-Орогоччу», «Сутам» и «Малый Орочен».

При увеличении глубины до 8 метров целесообразно использовать антенны с центральной частотой 250 МГц. В эту группу входят месторождения Алданского района: «Якоцит», «Селигдар-Долговский» и «Поисковый Умга-Нимгеркан», а также объект «Антагачан-Торбыкин» в Оймяконье.

Для зондирования на глубину до 12 метров применяются антенны с частотой 150 МГц. Данное оборудование эффективно на таких объектах, как «Ампынья» и «Широкий» (Оймяконский район), «Тимптон» и «Тимптон-Скобельцинский» (Нерюнгринский), а также «Секдекун» в Усть-Янском районе. Кроме того, данная аппаратура рекомендована для месторождений «Левый Кварцевый» в Момском районе, «Карстовый» в Ленском, «Ударник» в Верхоянском и «Нюра-Алдан» в Алданском районе.

В случаях, когда глубина исследований достигает 25 метров, оптимальным выбором становится гибкая линейная антенна АБДЛ-Тритон с частотой 50 МГц. «Скобельцинский» и «Юрский» (Нерюнгринский район), «Энтузиастов» (Усть-Янский) и «Лазо-Рудный» (Верхоянский). Также в эту группу включены алданские объекты «Первомайский» и «Малая Тырканда».

**Параметры измерений.** После определения технического задания и выбора технологии работ наступает этап установки начальных параметров съемки в программном обеспечении «GeoScan32», используемом для управления антенным блоком георадаров серии «ОКО». В процессе настройки оператор задает шаг перемещения между измерениями и общее количество накоплений сигнала, а также определяет число точек отсчета по вертикали, приходящихся на каждую реализацию. Для корректного формирования георадиолокационного профиля

необходимо одновременно выставить временную развертку по глубине в наносекундах, отрегулировать коэффициент усиления для компенсации затухания и указать диэлектрическую проницаемость исследуемой среды.

Ключевым параметром при проведении работ является накопление сигналов (N), которое подразумевает суммирование определенного количества сигналов в каждой точке профиля. Выбор этого значения напрямую коррелирует с требуемой детальностью изучения разреза и общей скоростью регистрации данных. Хотя высокое значение накопления существенно замедляет процесс съемки, такой подход оправдан необходимостью выделения полезного сигнала на фоне интенсивных аппаратных помех и внешних техногенных шумов.

Расчет дистанции между точками зондирования при реализации дискретного режима работы осуществляется на основании формулы (5.1). В данной методике определяющим фактором выступает пространственная разрешающая способность, жестко ограниченная радиусом первой зоны Френеля (R). Данный параметр фактически определяет габариты того участка среды, который задействован в формировании отраженного импульса, что необходимо учитывать для корректной интерпретации объектов на радарограмме [19]:

$$R = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}}^2}{16} + \frac{h\lambda_{\text{п}}}{2}} \quad (5.1)$$

где  $h$  – глубина границы в среде,  $\lambda_{\text{п}}$  – длина волны в среде.

Длина волны в породе находится по формуле  $\lambda_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{в}}}{\sqrt{\epsilon'}}$  (5.2), где  $\epsilon'$  – диэлектрическая проницаемость горной породы [17],  $\lambda_{\text{в}}$  – длина волны в воздухе. Рассчитанные параметры длин волн приведены в таблице 5.2. Параметры дискретных зондирований (оптимальное расстояние между точками измерений шаг -  $x$ ) максимально могут достигать  $\approx 6$  м, для частот 30 МГц (таблица 5.3). Из этого следует, что для антенн с центральной частотой 30 МГц реально определить объект со средними линейными размерами 1,5-3 м практически не представляется возможным.

Таблица 5.2 – Длина волны при зондированиях на различных частотах

Центральная частота, МГц	Длина волны в воздухе, м $\lambda_{в}$	Длина волны в породе $\lambda_{п}$ , м	
		для пород $\epsilon'=6$	для пород $\epsilon'=9$
1200	0,25	0,1	0,08
400	0,75	0,3	0,25
250	1,2	0,5	0,4
150	2	0,8	0,67
30	10	4,1	3,33

Таблица 5.3 – Размер зоны Френеля для различных глубин

Частота, МГц	Глубина границы - h, м	I зона Френеля - r, м	
		для пород $\epsilon'=6$	для пород $\epsilon'=9$
1200	1,5	0,28	0,25
400	5	0,88	0,79
250	8	1,41	1,27
150	10	2,03	1,83
30	20	6,47	5,83

Таблица 5.4 – Основные параметры сканирования и рекомендуемые значения измерений

Параметры зондирования	АБДЛ «Тритон» 30-50 и 100	АБ150	АБ250	АБ400	АБ500	АБ700
Развертка, нс	400-1600	200-600	100-400	100-200	50-200	50-100
Кол-во точек по глубине	511					
Накопление (N) воздух/контакт	32-64	4/8 - 64	4/8-64	4/8 - 48	4/8 - 32	4/8 - 16
Диэлектрическая проницаемость	В соответствии с табличными значениями					
Скорость сканирования (км/ч)	2 – 30					
Усиление	Влияет только на отображение сигналов 10 - 40					
Окно выравнивания	В зависимости от частоты и времени развертки, чтобы окно превышало период колебаний сигнала					
Режим сканирования по перемещению (шаг, мм)	-	50 - 100				30 - 50
Дополнительные настройки	Используется не так часто в зависимости от применяемых дополнительных устройств и настроек					
Аттенюатор	0/20	0/20	0	0		

В таблице 5.4 приведены уточненные параметры измерений для линейки «ОКО-2М». Данные базируются на источнике [104] и результатах наших собственных экспериментальных исследований.

### 5.1.2. Полевые работы

Обоснование выбора технологии выполнения полевых работ осуществляется на основе целей и задач исследований, электрофизических свойств зондируемых сред, сезонности планируемых работ, рельефа участка исследований, а также анализа результатов предшествующих работ, обобщения имеющейся геолого-геофизической информации и моделирования.

На первом этапе георадиолокационных исследований по фондовым материалам о геологическом строении района производства работ оцениваются мощность и литологические особенности рыхлых отложений, уточняются типы подстилающих пород, степени их трещиноватости, наличие подземных льдов и таликов, изучаются материалы предшествующих геофизических наблюдений. Далее, с использованием этой информации строится георадиолокационная модель верхней части геологического разреза. Определяется ожидаемая глубинность георадиолокации, оценивается эффективность ее применения на породах разреза.

На следующем этапе исследований проводятся рекогносцировочные работы – георадиолокационные измерения в точках опорного бурения по методике параметрических зондирований (раздел 5.1.3). Точки параметрических наблюдений детально исследуются измерениями по коротким пересекающимся профилям. По результатам сопоставления буровых и георадиолокационных работ вычисляются скоростные характеристики разреза и электрофизические свойства отдельных горизонтов для последующей точной интерпретации материалов. При отсутствии опорного бурения скоростные характеристики исследуемой среды измеряют по методу общей глубинной точки с разнесением антенн. Контрольными измерениями уточняется воспроизводимость результатов исследований. Рядом с устьем скважины в одной из точек параметрических зондирований выбирается геометрия приема-передачи георадиолокационного сигнала, и проводятся полевые измерения.

Обязательной составляющей частью технологии полевых измерений является сопоставление плана участка работ, или точная привязка к уже имеющемуся плану, разбивка профилей или топографическая привязка. По

топографической основе намечаются линии георадиолокационных профилей. Прослеживание отдельных, как правило, литологических границ разреза производится по линиям профилей, соединяющим между собой скважины. Конфигурация линий профилей не регламентируется, важна топографическая привязка точек перегибов профилей.

Выбор сети наблюдений при картировании горизонтально-слоистых сред представлен на рисунке 5.1. Схема проведения георадиолокационных измерений способом «змейка» по сети параллельных профилей представлена на рисунке 5.1а. В результате таких работ мы получаем карту глубин исследуемой границы в плоскости  $XU$ .

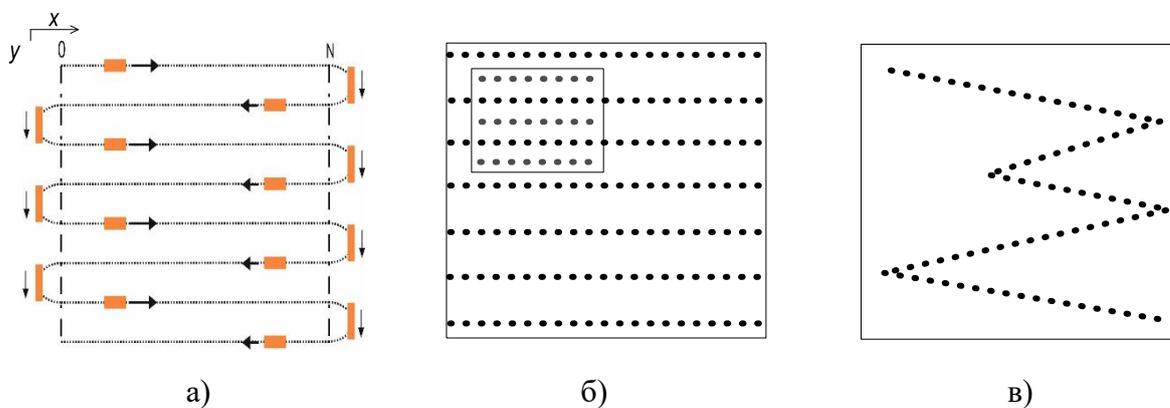


Рисунок 5.1 – Сеть площадных георадиолокационных измерений:

- а) регулярная неравномерная; б) регулярная неравномерная с детализацией участка; в) нерегулярная неравномерная

На рисунке 5.1б приведена регулярная неравномерная сеть с детализацией участка работ. Обычно такая сеть используется при детальном изучении рельефа плотика, оттайки мерзлоты. Нерегулярная неравномерная сеть наблюдения, представленная на рисунке 5.1в, наиболее часто применяется с речных и воздушных судов для картирования рельефа дна, измерения толщины ледяного покрова автосимников, картирования наледей.

Параметры георадиолокационной съемки – расстояние между профилями выбирается исходя из горно-геологических условий участка, детальности исследований, размещения инженерно-геологических скважин. Например, на россыпных месторождениях, где разведочные выработки обычно располагаются с шагом в 10–20 метров, при проведении детальных георадиолокационных работ по

изучению плотика расстояние между профилями целесообразно сократить до 5–10 метров. Если же стоит задача картирования обширных территорий, то интервал между профилями можно увеличить до 50–100 метров, а в отдельных случаях — до 500 метров.

Режим работ на больших площадях может быть как непрерывный (расстояние между точками измерений определяется накоплением сигналов и скоростью перемещения антенны, но обычно не превышает 10 см ( $\pm 5$ ) на измерение), так и в дискретных точках, в случае работ в условиях сильно пересеченной местности.

Наиболее сложной задачей является картирование локальных неоднородных сред. Зоны локальных неоднородностей могут быть представлены зоной тектонических нарушений, трещиноватости, разуплотнения, наличием пластовых и жильных льдов, негативных криогенных процессов (талики, криопэги) и т.д. Выбор сети наблюдения при картировании таких неоднородных сред представлен на рисунке 5.2.

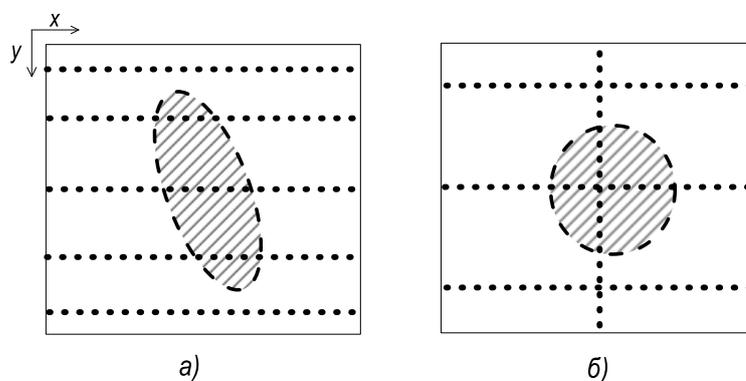


Рисунок 5.2 – Сеть площадных георадиолокационных измерений над локальной неоднородностью

В зависимости от размеров, форм неоднородности и глубины исследования работы проводятся в непрерывном режиме. Расстояние между профилями выбирается также исходя из размеров и форм объекта, с условием не менее трех поперечных профилей на протяженный объект (рисунок 5.2а). Для локального объекта, представленного на рисунке 5.2б, обязательно пересечение двумя профилями вдоль и поперек объекта. Также следует рассчитать длину профиля, которая должна быть достаточной для выявления участка аномальных волновых

полей, отличающихся от соседних по одному из признаков – конфигурация и протяженность осей синфазности, амплитудные значения, частотный состав, скорость распространения электромагнитных волн.

Таким образом, параметры георадиолокационной съемки - расстояние между профилями выбирается исходя из условия не менее трех поперечных профилей на объект. Для объекта со средними линейными размерами 1,5-3 м (лед, талик, зона суффозии и т.д.) работы должны проводиться в непрерывном режиме с расстоянием между профилями максимум 0,5-1 м.

Полевые георадиолокационные исследования выполняются двумя способами: точечным зондированием (дискретные замеры) или непрерывным профилированием вдоль выбранной линии. Непрерывный вариант оптимален для изучения однородных геологических разрезов, так как он позволяет без разрывов проследить границы пластов. Как правило, такая технология эффективна в условиях спокойного рельефа, где перемещение оборудования не затруднено особенностями местности.

Например, при измерениях на участке, подготовленном к взрывным работам, с водной поверхности дражного полигона, с полотна автодороги и т.д. При непрерывном измерении привязка георадиолокационных профилей осуществляется с помощью специальных меток. Привязка данных к ситуации осуществляется по пикетам, скважинам, особенностям рельефа и т. д. Метками также следует отмечать помехи, если они оказывают влияние на показания георадара.

В условиях сложной пересеченной местности георадиолокационные измерения проводятся дискретными зондированиями. Вариант дискретных измерений применяется для изучения относительно сложного разреза до максимально возможной глубины. Использование режима дискретных наблюдений дает возможность эффективно применять цифровое накопление сигналов, что важно для повышения чувствительности прибора и достижения максимальной глубинности исследований. В связи с этим при выполнении точечных измерений необходимо строго фиксировать шаг между точками

зондирования. Правильный выбор этого расстояния гарантирует получение объема данных, достаточного для детальной реконструкции геологического разреза и корректной интерпретации результатов. Зоны аномальных поглощений сигналов оконтуриваются дополнительными продольными и поперечными профилями. Проводятся детальные наблюдения на аномальных участках профилей.

Для проведения полевых измерений и сбора данных используется Блок Обработки (ноутбук, планшет, смартфон), к которому подключены антенный блок, блок управления, датчик перемещения (колесо) или GPS приемник. При перемещении георадара по профилю зондирования на экране отображается радарограмма, отображающая оси синфазности сигналов в виде черно-белых полос. На радарограмме, как правило, указывается расстояние, проходимое георадаром, глубина зондирования, время прохождения сигнала и специальные метки. С помощью специальных меток осуществляется «привязка» радарограммы к ситуации (столбы, углы зданий, водопропускные трубы и т.д.). При исследовании горных пород целесообразно отмечать особенности, характеризующие проявление экзогенных геологических процессов. Метками следует также отмечать помехи от поверхностных объектов, если они оказывают влияние на показания георадара. После завершения сканирования по профилю, проверяется результат съемки, если они достаточно качественные, то осуществляется сохранение георадиолокационного профиля в памяти компьютера

Для примера на рисунке 5.3 представлена схема профилей георадиолокационных зондирований на участке 405 месторождения «Маят». Размер участка 3,57км<sup>2</sup>. По предшествующим геофизическим исследованиям – магниторазведка и дипольное электромагнитное профилирование – на данной площади были выделены четыре аномальных участка. На этих участках были пробурены скважины.

*Рекогносцировочные* георадиолокационные зондирования были проведены в непрерывном режиме вдоль линии скважин, в створе которых были проставлены метки. Так по линии 405-1 произведена георадиолокационная съемка по 2-м поперечным и 3-м продольным профилям. Работы проводились по методике общей

глубинной точки (ОГТ) с использованием разноса антенн-АВ150. Было получено 14 первичных файлов данных (1418 сигналов) и определены характеристики исследуемого грунта. Для расчета глубин залегания была принята средняя скорость  $V = 0,1$  м/нс, что соответствует относительной диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon=9$ .

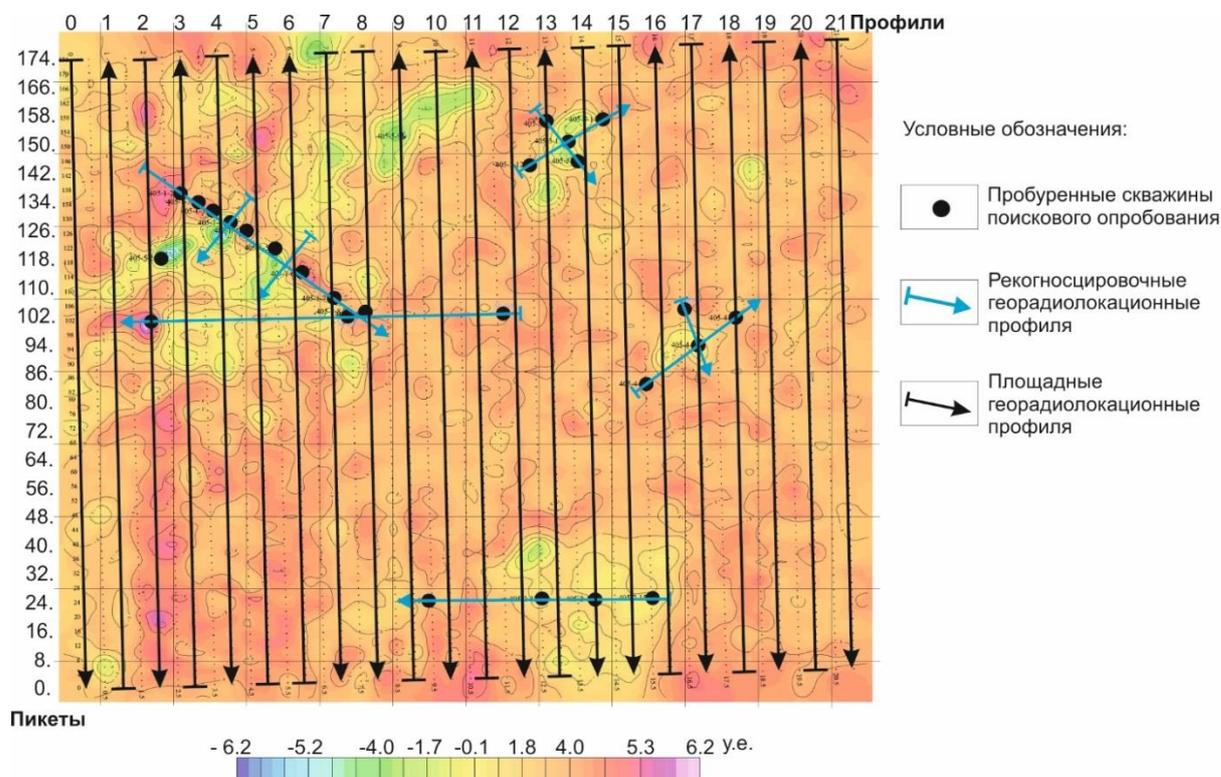


Рисунок 5.3 – Схема профилей георадиолокационных исследований на участке 405 месторождения «Маят» (АО «Алмазы Анабара»)

*Площадная съемка* проведена по сети 22-х параллельных профилей, записано 7506 сигналов. Работы проводились аппаратурой АБДЛ-Тритон. Съемки произведены «змейкой». Режим проведения работ дискретный через 5 м. Длина профилей 1740 м. Между профилями 100 м. Привязка профилей производилась по пикетам с шагом 20 м.

На техногенных участках и в условиях действующих месторождений проектирование параллельных профилей часто оказывается невыполнимым, что требует корректировки методики получения полевых материалов к конкретным горнотехническим условиям объекта. В таких обстоятельствах полевые работы реализуются в два этапа, сочетая георадиолокационное профилирование с

параметрическими зондированиями в отдельных точках. Использование систем спутникового позиционирования с автоматической синхронизацией координат позволяет отказаться от «жесткого» параллельного распределения профилей и размещать их в произвольном порядке с нерегулярным распределением по всей площади картирования (рисунок 5.4) [61].



Рисунок 5.4 – Схема профилей при георадиолокационном картировании распределения крупных структурных изменений в коренных породах на участке «Древняя долина»

### 5.1.3 Прослеживание границы продуктивных горизонтов

Основные запасы алмазов сосредоточены в отложениях русла, кос и низкой поймы реки Далдын – левого притока реки Молодо, протекающих по территории Республики Саха (Якутия). На отдельных участках долины р. Далдын рассматриваемая россыпь сложена русловыми отложениями, и её ширина в этом случае определяется шириной самой реки, равной 20-30 м. Однако в тех случаях, где наблюдается весь комплекс отложений, ширина русловой россыпи увеличивается, достигая нередко 150 м. Минимальная мощность руслового аллювия 0,2-0,3 м, максимальная 6-7 м. В нижнем течении средняя мощность составила 2,6 м, а в верхнем течении – 2,2 м.

На участке россыпного месторождения выполнены исследования георадаром «ОКО-3» с антенными блоками АБ-250 и АБ-100, центральные частоты которых

составляют 250 МГц и 100 МГц соответственно (рисунок 5.5). Полевые измерения выполнены в площадном варианте с расстоянием между профилями от 30 до 50 м. Для точной привязки данных георадиолокации к местности использовался датчик перемещения с колесом ДП-32 и спутниковый приёмник GNSS.



Рисунок 5.5 – Фотография измерения георадаром «ОКО-3» с антенным блоком АБ-250

Для выделения полезных отражений георадиолокации и привязки их к литологическим разностям использованы данные бурения, проведенные после георадиолокационных измерений. При обработке данных и анализе радарограмм применены разработанные алгоритмы и программно-методическое обеспечение (подглава 3.1), позволившие проследить кровлю коренных пород и границу «торфа-пески». По данным бурения на участках работ установлено среднее значение диэлектрической проницаемости – основной электрофизический параметр, определяющий масштаб глубин георадиолокационных разрезов. Диэлектрическая проницаемость составила по разрезу  $\epsilon'=5$ . На рисунке 5.6 представлены примеры прослеживания кровли коренных пород и границы «торфа (вскрышные породы) – пески (продуктивный пласт)» на одном из участков россыпного месторождения алмазов.

На основе полученных результатов измерений с использованием программы Surfer и процедуры геостатистического метода Kriging построена карта глубин коренных пород и изомощности песков. Например, по участку № 5 (рисунок 5.7) максимальная глубина коренных пород составила 6,5 м, минимальная 1,8 м, при средней по участку 4,8 м. Максимальная мощность песков составила 4,8 м, минимальная 0,7 м, при средней по участку 2,96 м.

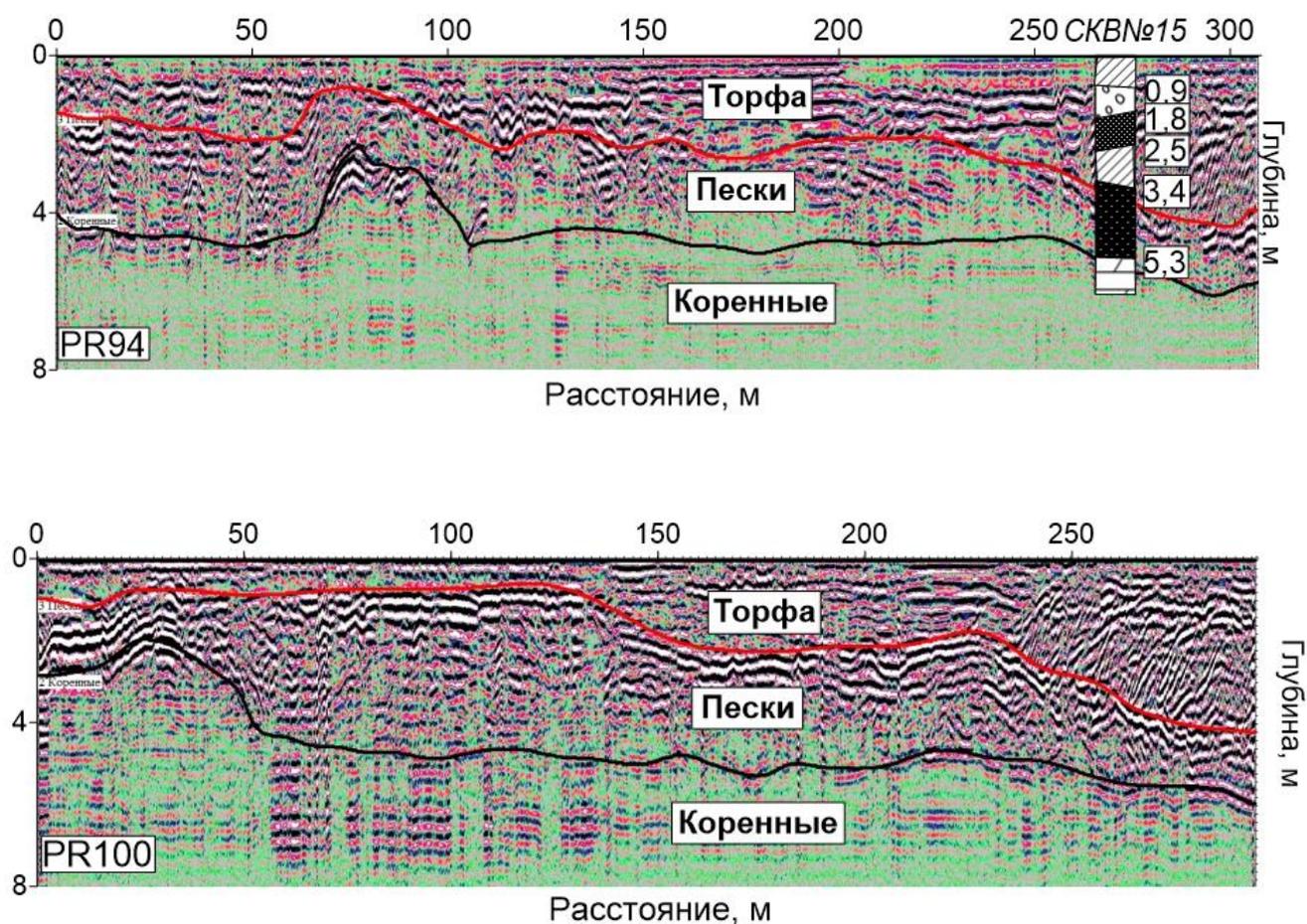


Рисунок 5.6 – Георадиолокационные разрезы по профилю PR94, PR100

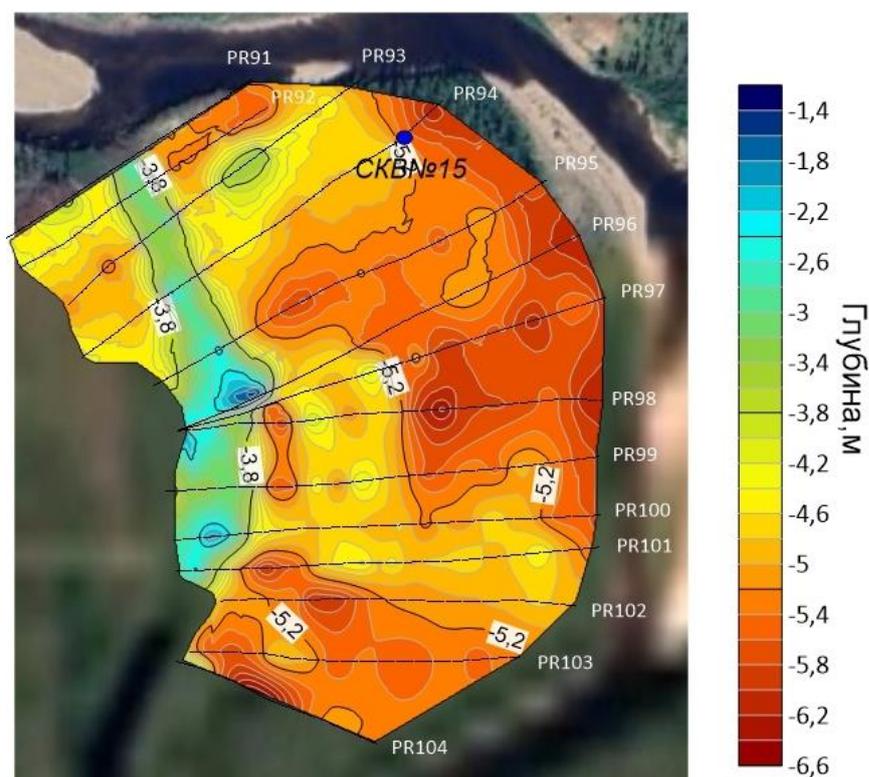


Рисунок 5.7 – Карта глубины залегания коренных пород на участке месторождения

## 5.2 Методика георадиолокационного картирования дражных полигонов

### 5.2.1 Дистанционные исследования методом георадиолокации

Для картирования строения донных отложений дражных водоемов георадиолокационные зондирования проводятся *с водной поверхности* (рисунок 5.8). В ходе исследований установлено, что при движении георадара «ОКО-2» по водной поверхности с неравномерной скоростью с извилистой траекторией и при использовании не связанного с георадаром устройства координатной привязки происходит несоответствие количества георадиолокационных трасс и географических координат. При этом корректировка данных осуществляется вручную, что является трудоемким процессом, а результат недостаточно точным. Современное программно-аппаратное обеспечение георадаров для синхронизации георадиолокационных данных и данных GPS (географические координаты) позволяет получать информацию о местоположении съемки каждого георадиолокационного сигнала (трассы). Что, несомненно, повышает качество

георадиолокационной съемки на водных объектах, особенно с присутствием течения [165].



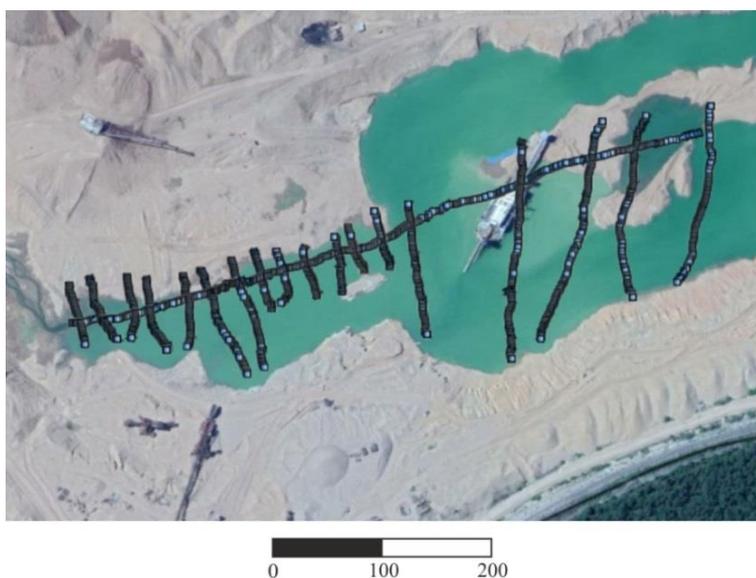
Рисунок 5.8 – Вариант применения георадара с экранированным антенным блоком для исследований донных отложений с водной поверхности

Результаты проведения георадиолокационных измерений показали, что для хранения данных о местоположении трасс наиболее информативен формат десятичных долей градуса, позволяющий повысить точность определения местоположения, в отличие от стандартного представления географических координат (градусы, минуты, секунды). Также разработан алгоритм, включающий обработку георадиолокационных профилей с привязкой к географическим координатам и отображением на карте местности, что позволяет получить массив данных для построения карты глубин водоема и модели рельефа дна [154].

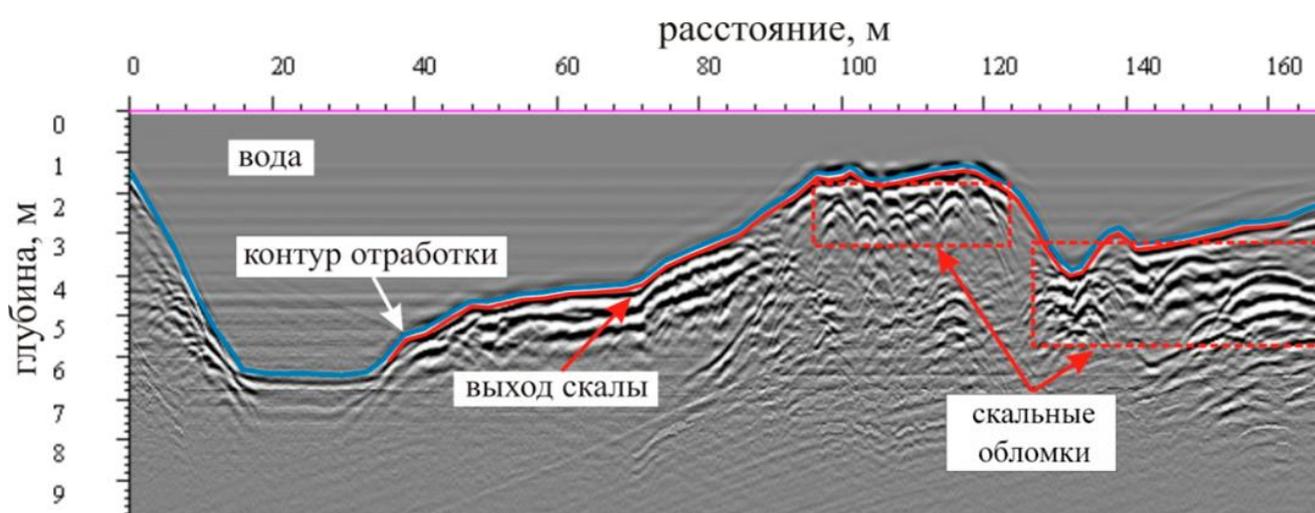
Описанные выше методические разработки были применены на месторождении р. Большой Куранах при исследованиях на участке, находящемся на стадии отработки роторным земснарядом. Обследуемый участок интересен тем, что на его территории присутствует скальный выход, часть которого скрыта под толщей воды. Сбор данных с водной поверхности осуществлялся при помощи георадара «ОКО-2», оснащенного линейными дипольными антеннами АБДЛ-Тритон с рабочей частотой 50 МГц (рисунок 5.9).



а) - Георадиолокационные исследования дражного котлована



б) - Схема георадиолокационных профилей на дражном котловане



в) - Георадиолокационный разрез по очистному пространству дражного котлована

Рисунок 5.9 – Георадиолокационные исследования с водной поверхности дражного котлована (р. Б.Куранах)

Методика полевых работ включала выполнение серии профилей, согласно схеме на рисунке 5.9б. Протяженность 19 поперечных профилей варьировалась в диапазоне от 60 до 200 метров. Дополнительно была произведена запись продольного профиля значительной протяженности — 675 метров для обеспечения большой точности съемки.

Для решения проблемы навигации в условиях отсутствия ориентиров предложено загружать план профилей в GPS-приемник и корректировать курс плавсредства в режиме реального времени. Для последующих трехмерных построений обязательным условием является синхронизация георадиолокационных данных с GPS-координатами, обеспечивающим точную привязку каждого сигнала (трассы) [154].

В центральной части котлована коренные породы прослеживаются под водой и частично выходят на поверхность. Наличие этого естественного препятствия, вкупе с позицией самого земснаряда, технически ограничило возможность сплошного профилирования, в результате чего локальный участок остался вне зоны покрытия георадиолокационной съемкой (рисунок 5.9).

В результате камеральной обработки данных был установлен контур котлована с диапазоном глубин от 1,5 до 13,5 м, а также разработана 3D-визуализация геологического строения (рисунок 5.10). Данная модель позволила выявить зоны обнажения коренных пород на глубинах 4,5–7,5 м [154, 225].

На отдельных участках разреза зафиксированы выходы пород, пространственно связанные со скоплениями скальных обломков. Обработанные георадиолокационные разрезы послужили основой для определения точных геометрических параметров котлована, необходимых для обеспечения его дальнейшей эффективной отработки.

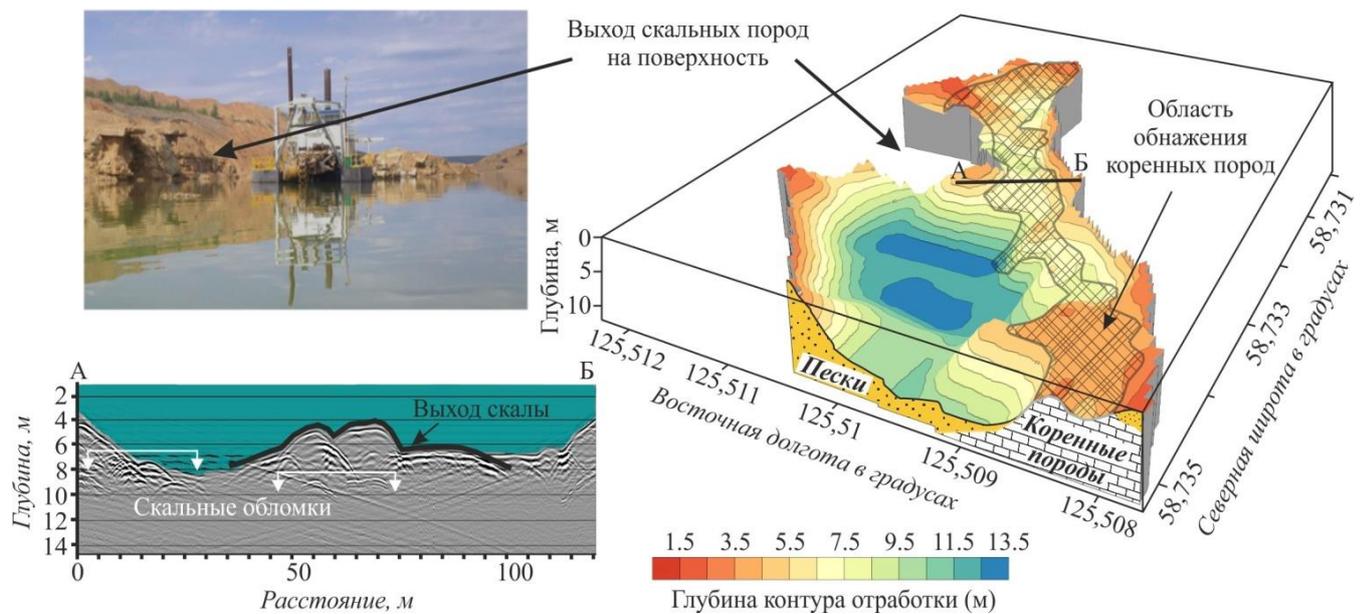


Рисунок 5.10 – Площадные георадиолокационные исследования отработки дражного котлована с водной поверхности на участке выхода коренных пород (месторождение р. Б.Куранах)

Таким образом, георадиолокационное картирование с GPS-привязкой обеспечивает 3D-визуализацию геологического строения россыпи и её структурных элементов (мощность песков, гипсометрия и нарушенность плотика). Данный подход обеспечивает оперативный контроль добычи продуктивных песков, а также позволяет своевременно картировать участки геологических осложнений, что необходимо для корректировки плана горных работ.

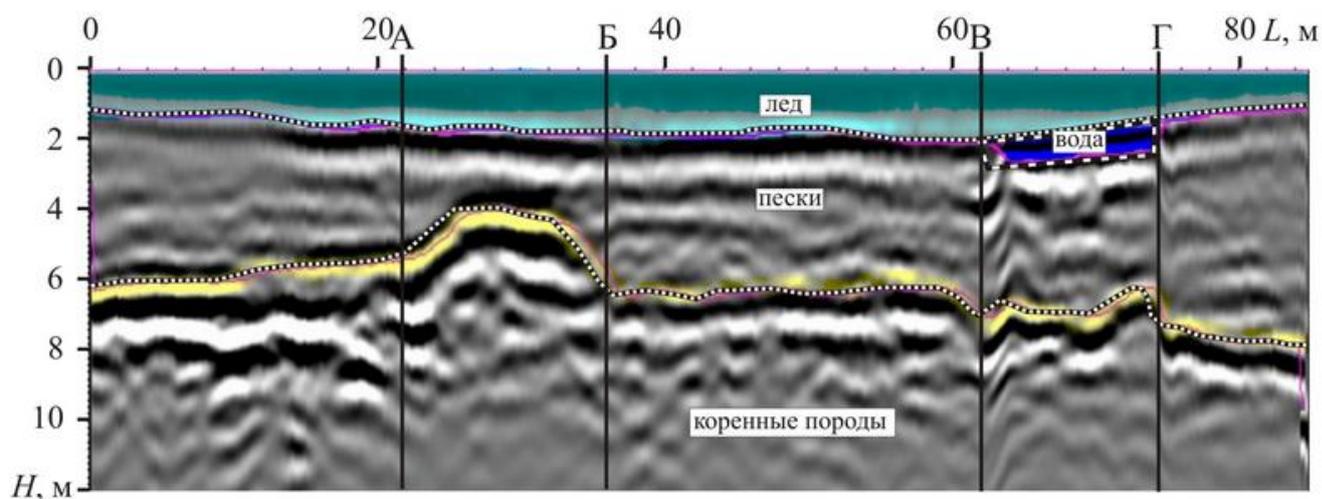
### 5.2.2 Уточнение местоположения структурных особенностей строения массива горных пород

Для картирования рельефа плотика на дражном полигоне р. Аллах-Юнь проведена георадиолокационная съемка с ледового покрова [68, 107]. Работы велись в весенний полевой сезон по расчищенным проходам георадаром «ОКО-2» с частотой антенн 50 МГц (АБДЛ-Тритон) (рисунок 5.11). Масштаб глубин георадиолокационных разрезов определен, основываясь на данных опорной скважины.



Рисунок 5.11 – Выполнение георадиолокации методикой профилирования на участке дражного полигона

Анализ поперечного разреза дражного полигона (рисунок 5.12) выявил в интервале 63-75 м (интервал ВГ) наличие влажной таликовой зоны, проявление которой на радарограмме сопровождается низкочастотными сигналами с высокой амплитудой. На этом же разрезе, на отрезке 23-37 м (интервал АБ), обнаружено локальное поднятие плотика амплитудой более 2 м [207]. Такие поднятия представляют серьезную угрозу для безопасности дражного комплекса, особенно в ситуациях, когда технически невозможно оперативно регулировать уровень воды в котловане или изменять ход драги [169].



Условные обозначения:  
 АБ (23-37 м) - участок поднятия плотика;  
 ВГ (63-75 м) - участок незамерзшей воды.

Рисунок 5.12 – Георадиолокационный разрез по профилю 1-1'

По результатам площадной съемки построена карта гипсометрии плотика (рисунок 5.13) с градацией глубин 0,5 м [154, 225]. Цветовой раскраской выделены зоны поднятий (3-4 м), критичные для прохождения драги, и западения плотика, перспективные на повышенные концентрации полезного ископаемого.

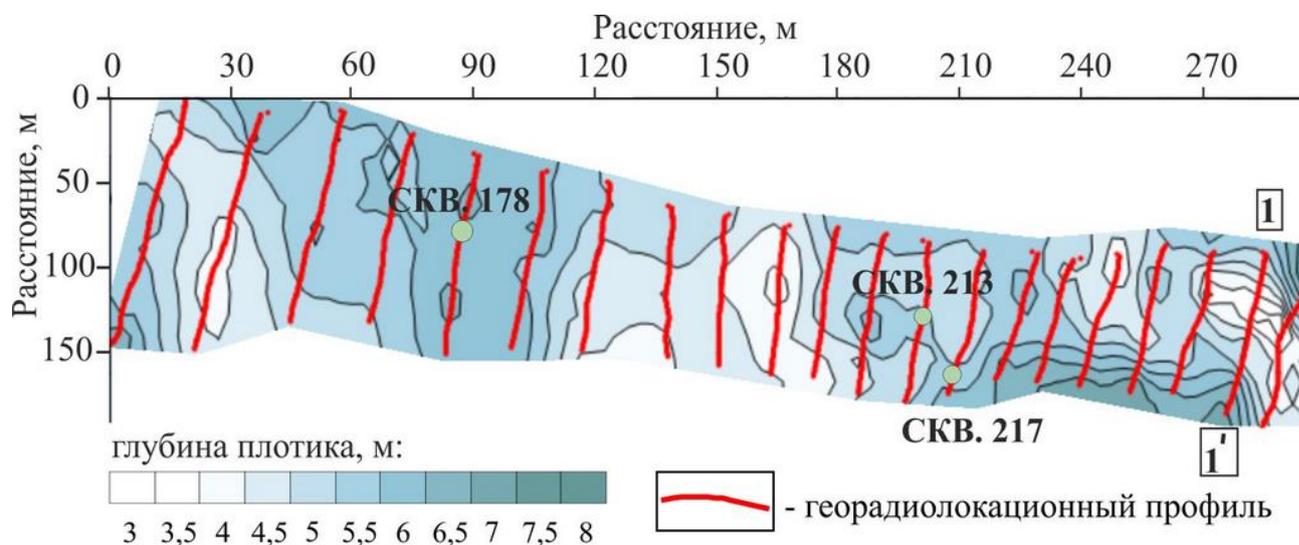


Рисунок 5.13 – Гипсометрия плотика на очистном пространстве дражного полигона по данным георадиолокации (месторождение р. Аллах-Юнь)

Для проведения исследований на территориях, где выполнение наземного зондирования затруднено или неосуществимо, разработана **Технология георадиолокации с борта воздушного судна** [14, 84, 89, 148, 160, 203, 204].

Данная технология подразумевает осуществление непрерывного профилирования масштабных линейных и площадных объектов с обеспечением точной географической привязки данных через системы спутникового позиционирования. Например, это задача картирования наледей на автозимниках, безопасная эксплуатация которых актуальна для бесперебойного обеспечения грузоперевозок горнодобывающих предприятий.

В ходе проведения дистанционных измерений модернизированный георадар АБ-400 монтируется на вертолет МИ-8 или самолет АН-2 в районе люка с помощью подвешного устройства (рисунок 5.14а). В случае использования борта EuroStar SLW блок фиксируется на днище судна стальными стяжками, закрепляемыми на стойках шасси (рисунок 5.14б). Контроль функционирования георадара «ОКО-2»,

включая настройку параметров сканирования, отображение данных в реальном времени и сохранение полученных результатов, производится через полевой компьютер с ПО GeoScan32 (группа компаний «Логис-Геотех»). Оборудование размещается в салоне судна, где организуется рабочая зона оператора (рисунок 5.15а, б).



а)



б)

Рисунок 5.14 – Общий вид воздушных судов - самолёта АН-2 (а) и самолёта EuroStar SLW (б), оборудованных георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-400



а)



б)

Рисунок 5.15 – Расположение антенного блока АБ-400 и мобильного персонального компьютера в вертолете МИ-8 (а) и в самолёте АН-2 (б)

Проектирование сети маршрутов для охвата обширных территорий базируется на анализе космических снимков Sentinel-2 (Scihub.copernicus.eu). Навигация по заданной траектории обеспечивается бортовым GPS-навигатором, а географическое позиционирование данных георадиолокации — штатным GPS-приемником комплекса.

Оптимальный скоростной режим полета при изучении речного льда варьируется в пределах 100–150 км/ч при высоте 20–30 м. Данные летные регламенты продиктованы необходимостью соблюдения норм авиационной безопасности и минимизации расхода горюче-смазочных материалов при проведении масштабных работ.

Анализ летно-технических характеристик летательных аппаратов (вертолет, самолет, БПЛА) на рынке услуг, с учетом экономических и эксплуатационных издержек и результатов опытных полетов, позволил определить наиболее оптимальный вариант в виде легкомоторного самолёта.

Данный тип самолета позволяет выполнять полеты дальностью до 1300 км. Средняя скорость полёта самолёта в процессе измерений составляет 100 км/ч, высота полёта – 20-30 м над уровнем ледяного покрова реки.

На рисунке 5.16 приведен пример исследования участка выхода воды на ледовой переправе «Кангалассы – Соттинцы». Фотография исследования ледяного покрова на р. Лена георадаром с борта самолета приведена на рисунке 5.17а. Полученный фрагмент радарограммы ледовой переправы представлен на рисунке 5.17б, на которой красными метками отмечен участок воды на поверхности льда. В последующем такая вода на льду замерзает и образует наледь.

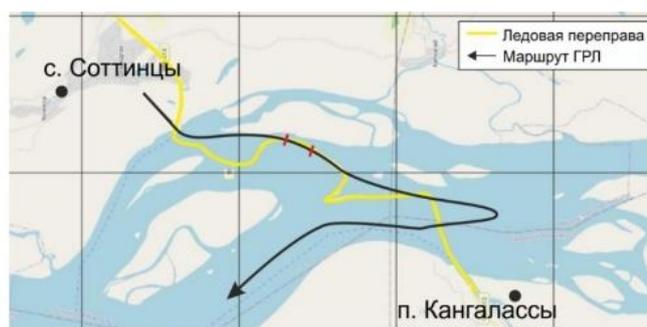
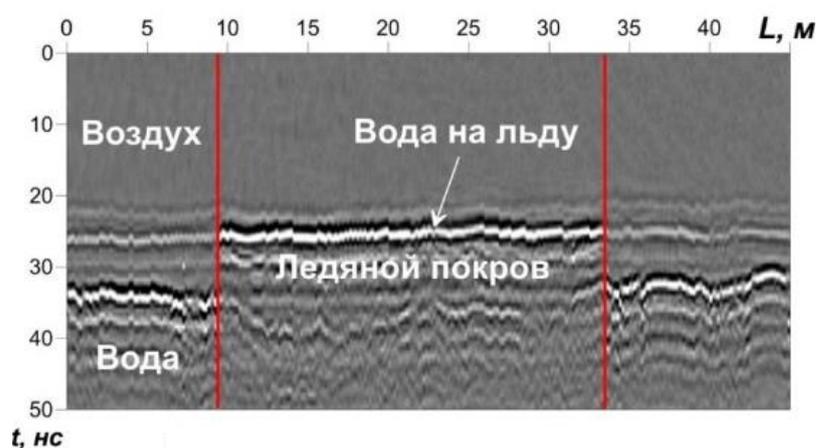


Рисунок 5.16 – Маршрут георадиолокационного исследования ледяного покрова



а) Исследование ледовой переправы георадаром с самолета



б) Фрагмент радарограммы ледовой переправы

Рисунок 5.17 – Георадиолокационные исследования ледовой переправы на р. Лена с самолета EuroStar SLW

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

Опыт буровзрывных работ для подготовки торфов к выемке на россыпных месторождениях Субарктической зоны показал, что наличие в составе вскрышных пород подземных льдов существенно снижает эффективность взрыва, приводящий к снижению качества дробления вплоть до выхода негабаритов [5, 26, 40, 122, 134].

На участках россыпного месторождения, осваиваемого АО «Алмазы Анабара», были выполнены измерения с применением георадара «ОКО-2», оснащенного антенным блоком АБ-250. Комплекс полевых мероприятий объединил в себе георадиолокационное профилирование буровзрывных блоков,

топогеодезическую фиксацию точек зондирования, а также камеральную обработку и последующий анализ полученных результатов.

Георадиолокационные измерения на объектах «Пески», «Торфа» и «РОК» были организованы в апреле 2016 года. Суммарная длина пройденных профилей достигла 3489 м. На рисунке 5.18 продемонстрирован процесс съемки буровзрывных участков с использованием блока АБ-250 (а), а также процедура оперативного мониторинга входящей информации для внесения правок в настройки оборудования (б).



а)



б)

Рисунок 5.18 – Георадиолокационная съемка георадаром «ОКО-2» (а) с последующим просмотром полученных данных измерений (б) на буровзрывных участках

Полученные радарограммы непрерывного георадарного зондирования в пределах исследуемого района демонстрируют однотипную слоистую структуру. Анализ и интерпретация результатов проводились с опорой на сведения, полученные из скважин № 12-52, 12-170, 10-250, 9-10, 9-30 и 9-175. На обработанных радарограммах четко прослеживается граница контакта подошвы рыхлых наносов с подстилающими породами.

Нижележащий горизонт представлен коренными доломитами. Кроме того, зафиксированы локальные аномалии, интерпретируемые как линзы льда. На волновой картине данные образования характеризуются сигналами с высокой амплитудой, а в ряде случаев — наличием кратных отражений. Границы, выявленные на глубинных отметках 4–8 м, соответствуют кровле выветрелых

(нарушенных) коренных пород, что подтверждается «хаотичным» распределением отраженного сигнала.

На основе материалов георадиолокационных изысканий была сформирована схема пространственного распределения локальных неоднородностей, обусловленных наличием ледяных линз (рисунок 5.19). Анализ показал широкое распространение включений льда с примесями литологических разностей на изученной территории. Подземные льды локализованы как в слоях торфяных залежей, так и внутри песчаных горизонтов.

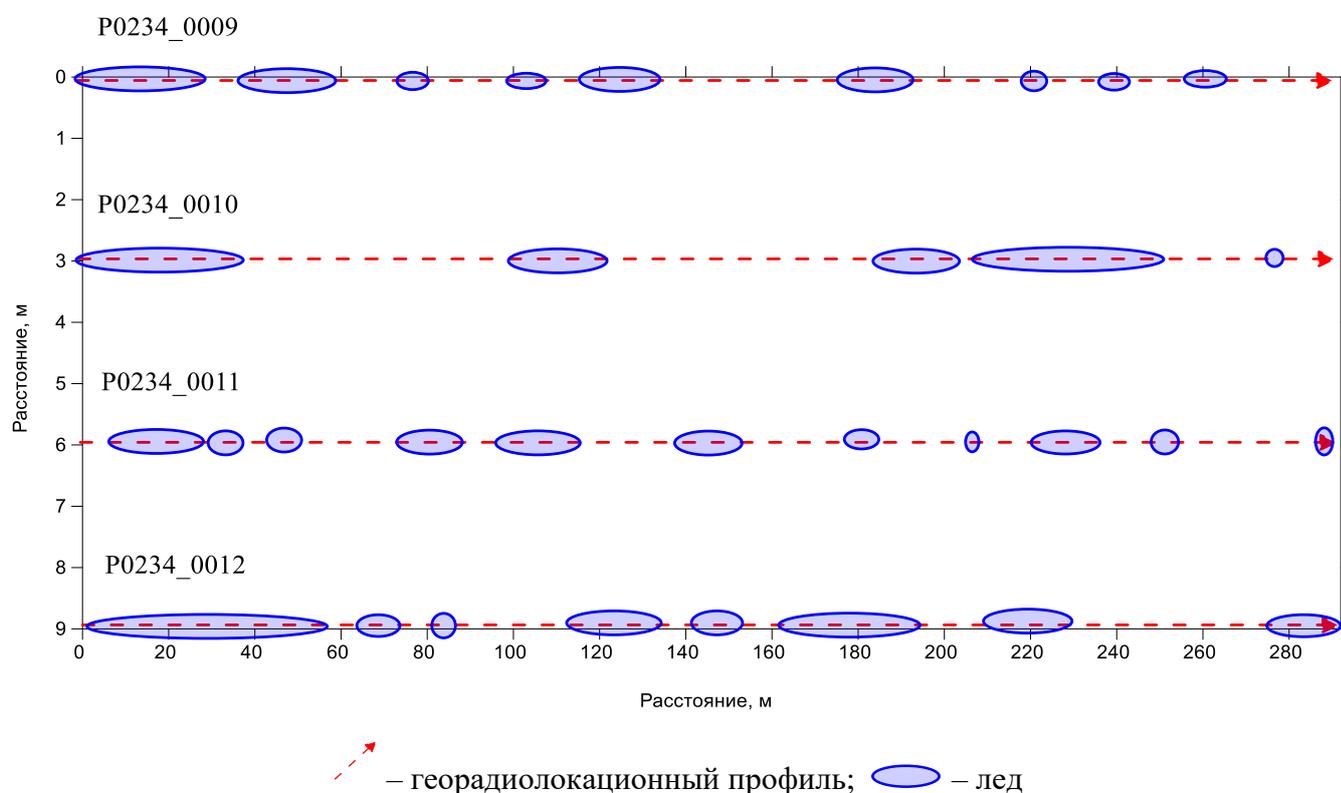


Рисунок 5.19 – Результаты картирования распространения льдов по данным георадиолокации

В результате площадных исследований вскрышных пород определено наличие подземных льдов (рисунок 5.20а). Они залегают на коренных породах, в толще песков и перекрыты торфами. Отраженные георадиолокационные сигналы от кровли льда образуют сплошную высокоамплитудную – непрерывную ось синфазности. Его подошва прослеживается по схожим характеристикам, на отрезке 8-13 м ось синфазности прерывается гиперболами, образованными дифракцией электромагнитных волн на обломочных коренных породах.

При компьютерном моделировании георадиолокационных зондирований

пластового льда в однородной среде с включениями гальки, синтетическая радарограмма имеет похожее волновое поле, на котором отображаются горизонтальные оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ льда, а галька проявляется в виде дифрагированных волн. Сравнительный анализ выявил расхождение между теоретическими построениями и полевыми материалами. Характерные для математических моделей кратные отражения, формируемые кровлей и подошвой льда, на реальных радарограммах практически не фиксируются. Причиной маскировки полезного сигнала выступает мощный шумовой фон, вызванный дифракцией волн на крупнообломочном материале коренных пород.

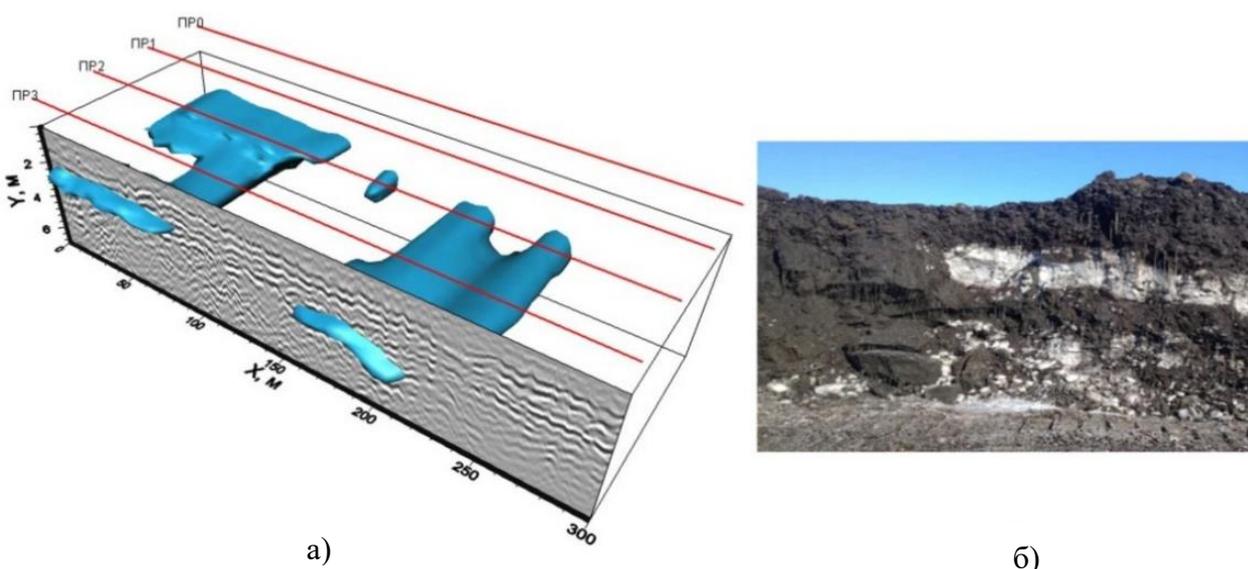


Рисунок 5.20 - Результат экспериментальных георадиолокационных исследований пластового льда на россыпном месторождении (АО «Алмазы Анабара»):

а) 3D карта по данным георадиолокации; б) борт вскрышного блока

Интерпретация радарограмм основана на различиях волновых картин:

- Пластовые льды: выделяются как протяженные, непрерывные оси синфазности, амплитуда которых может варьировать.

- Вмещающие породы: в отличие от льда, рыхлые отложения и скальные обломки формируют хаотичную картину. Оси синфазности здесь имеют прерывистый характер, а разрез насыщен множественными гиперболическими аномалиями, возникающими при отражении от локальных объектов (валунов, гальки, обломков породы). Результаты интерпретации радарограммы подтверждаются визуальным наблюдением борта вскрышного блока (рисунок 5.20б).

## Выводы к главе 5

На основе анализа параметров георадиолокации и возможностей современной георадиолокационной аппаратуры серии «ОКО» обоснована технология проведения полевых измерений, обеспечивающая глубинность и детальность исследований, достаточные для картирования россыпных месторождений криолитозоны, с целью уточнения пространственного распределения полезного ископаемого, определяемого геологическим опробованием.

Разработана методика георадиолокационных зондирований дражных полигонов россыпных месторождений криолитозоны для выявления структурных особенностей геологического строения россыпи (мощность песков, участки повышенной валунистости, гипсометрия и нарушенность плотика), отличающаяся получением данных с высокоточной GPS привязкой в формате десятичных долей градуса при исследованиях с водной поверхности дражного котлована.

Для решения задач исследования участков, где проведение зондирований с поверхности невозможно, разработана технология георадиолокации в дистанционном режиме с борта воздушного судна, включающая непрерывное профилирование протяжённых и площадных участков исследований с географической привязкой с помощью системы спутникового позиционирования. Например, это задача картирования наледей на автотрассах, безопасная эксплуатация которых актуальна для бесперебойного обеспечения грузоперевозок горнодобывающих предприятий.

## **ГЛАВА 6. ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ НА УЧАСТКАХ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ**

### **6.1 Георадиолокационные параметрические зондирования**

Выявление геологических структур методом георадиолокации не всегда достигается непрерывным профилированием. При такой методике возникают проблемы, с которыми сталкивается любой исследователь. В основном это неровность рельефа по профилю, а также обводненность поверхности, пересечение профиля ручьями или оврагами, поваленные деревья. Кроме того, на проведение георадиолокационной съемки влияют и приповерхностные объекты вблизи профиля, представленные, например, спецтехникой. Развитие метода георадиолокации в таком случае основано на использовании и усовершенствовании стандартных методик, а также разработке новых, позволяющих изучить характеристики горных пород. Особенно это касается оценки скорости радиолокационного сигнала, позволяющей преобразовать временной разрез в глубинный [220, 254].

Еще одним фактором, влияющим на получаемые георадиолокационные данные, является тип антенн георадара [19]. Незэранированные антенны более подвержены принятию сигналов-помех от внешних объектов и электромагнитных помех. Некоторые исследователи занимаются вопросом защиты георадара от электромагнитных помех, использованием радиопоглощающих-радиорассеивающих материалов [27, 141], которые, в качестве опытного образца использовали георадар серии «ОКО», с центральной частотой излучения 400 МГц. В своей работе они исследовали возможность применения металлизированных тканей с высокими коэффициентами экранирования (порядка 60 дБ), но, обладая высокими отражающими способностями, эти материалы вызывали паразитные переотражения внутри антенного блока. Поэтому в дальнейшем был выбран радиопоглощающий материал (РПМ) на основе пенополиуретана, снижающий

влияние помех, но трудно применимый в реальных условиях, и многослойный материал коврового типа, который оказался наиболее подходящим.

Применение линейных неэкранированных антенн, таких как АБДЛ-Тритон (30 МГц), серии георадаров «ОКО» позволяет достичь глубины исследований до 30 м. Размер антенн влияет на преодоление ими неровных участков рельефа, чем крупнее антенна, тем чаще она теряет контакт с исследуемой поверхностью. Антенные излучатели, в данном типе георадара, выполнены в виде сегментов, что повышает плотность контакта со средой. Однако, при перемещении георадара, происходит систематический (с каждым шагом оператора) или постоянный отрыв от поверхности среды первого сегмента приемной антенны. Наиболее неблагоприятный случай – это случай систематического отрыва. При этом на радарограмме образуются периодические сигналы-помехи, особенно выраженные в верхней части радарограммы. Достаточно часто такие помехи могут перекрывать полученные сигналы, в результате чего некоторые данные полностью выпадают из рассмотрения.

На участках исследований геологических структур, расположенных в болотистой и любой другой труднопроходимой местности, сложно сохранить постоянную скорость перемещения георадара, тем самым сохранять равномерность распределения сигналов на радарограмме. Поэтому на таких участках, с перечисленными выше факторами, при проведении исследований георадаром с линейными антеннами, необходимо применять методику, позволяющую частично или полностью исключить эти явления.

В этом случае рационально проводить по одному измерению в каждой точке без поворотов антенн, т.е. проводить дискретное профилирование. Антенны георадара находятся в неподвижном состоянии в момент зондирования, тем самым исключается возможность появления сигналов-помех от их перемещения. Для сохранения условия непрерывности георадиолокационного разреза, шаг зондирования должен соответствовать первой зоне Френеля, или быть меньше ее. В ином случае, шаг зависит от необходимой детальности съемки.

Другим вариантом может быть методика изучения участка *параметрическими георадиолокационными зондированиями* в отдельных точках или короткими профилями с последующей интерполяцией при площадных построениях. В работах [77, 78, 88], Нерадовский Л.Г. доказал эффективность применения параметрических зондирований методикой группирования сигналов с изменением положения и ориентации антенн георадаров при многократном измерении сигналов в окрестности точек зондирований в пределах 1-ой зоны Френеля. При записи не менее 36 сигналов, данная методика обеспечивает определение радиофизических характеристик многолетнемерзлых пород с погрешностью 5%. Основным принципом группирования являются параметрические измерения на опорных точках с известным строением разреза. Т.е. методика служит для привязки определенных сигналов к соответствующим геологическим границам, и не может использоваться самостоятельно для построения глубинного разреза без предварительной информации о породах, слагающих разрез. Для этого можно использовать георадиолокационное профилирование над локальными неоднородностями [17]. Оценка скорости распространения волн выполнялась в программном комплексе GeoScan32 с использованием процедуры «Гипербола». Метод заключается в наложении гиперболы на ось синфазности дифрагированной волны на радарограмме. Параметры этой гиперболы меняют до тех пор, пока она точно не совпадет с рисунком волны на радарограмме [106].

При отсутствии неоднородностей в исследуемой среде для определения скорости реализуют методику общей глубинной точки [17, 194, 254]. В этом случае измерения ведутся на переменной базе приемной и передающей антенн.

При наличии скважин или шурфов на участке исследований, а также иной информации о глубине залегания геологических слоев, определение скорости распространения волн заключается в сопоставлении этих данных с данными георадиолокации. По известной мощности слоя и времени прихода отраженной волны, рассчитывается скорость ее распространения [17, 194, 220].

В некоторых случаях, для определения средних значений скоростей распространения электромагнитных волн, применяется *методика просвечивания*. Для ее выполнения конструкция георадара должна позволять разносить источник и приемник на расстояние до нескольких десятков метров. Результат использования данной методики представлен исследованиями различных пластов Верхнекамского месторождения солей [47]. Приемная и передающая антенна располагались в соседних камерах по бортам исследуемого целика. При известной его мощности в нескольких заданных положениях антенн определена скорость распространения электромагнитных волн в соляных породах на частотах 100, 200 и 400 МГц.

По материалам работы Бричевой С.С. [10] определение скорости распространения электромагнитных волн предлагается проводить на натурной модели параметрическими зондированиями. Для этого методика предполагает подготовку двух шурфов, расположенных друг против друга. Геометрические размеры шурфов должны обеспечить расположение в них блоков приемной и передающей антенны. Измерения проводятся «на просвет» отдельными антенными блоками, затем дополняются еще двумя измерениями совмещенными антеннами в каждом из шурфов. Основываясь на размерах модели, расстоянии между шурфами, рассчитывается скорость в исследуемой среде.

В случаях, когда антенны георадара неразъемные (моноблочная конструкция георадара) Бричевой С.С. предлагается проводить параметрические зондирования моноблочной антенной из одного шурфа в другой [11]. А расчет скорости при этом определять по двойному времени прохождения расстояния электромагнитной волной в среде между шурфами. По мнению автора разработанной методики, такой способ зондирований на натуральных объектах демонстрирует хорошие результаты и менее трудозатратный, чем классические методы определения скорости. Однако, в условиях промерзших пород применение этой методики затруднено, т.к. без дополнительной техники подготовка шурфов практически невозможна.

Для осуществления зондирований в условиях ограниченного пространства и пересеченной местности можно применить *угловое георадиолокационное*

**сканирование** [67, 90]. Данный способ позволяет получать радарограмму с набором уникальных трасс сигналов, записанных под различными углами к отражающей горизонтальной границе, из одной точки наблюдений (одного местоположения) [207]. Последовательность сигналов на радарограмме при этом образует волновую картину с осями синфазности аналогично реализации методики профилирования (рисунок 6.1а, б). Для выполнения исследований по методике углового георадиолокационного сканирования применяется доработанный антенный блок георадара (рисунок 6.1в) [87].



Рисунок 6.1 – Схема углового георадиолокационного сканирования

Диаграмма направленности используемого георадара широкая и предельные углы сканирования находятся в секторе 60-70 градусов. Так, при зондированиях в секторе 60 град задержка времени регистрации отраженного сигнала изменяется в пределах 1 нс, что позволяет получать практически ровную отражающую границу в низкоскоростной среде (вода) [226]. Таким образом, при угловом сканировании происходит накопление отраженных сигналов от исследуемой горизонтальной границы. В результате накопления данных зондированиями из одного местоположения амплитуды регулярных сигналов возрастают, а непостоянные сигналы-помехи распределяются по временной области, теряя свою

интенсивность, за счет этого повышается точность и достоверность исследований [63].

Первичная обработка данных углового сканирования включает сборку радарограмм из отдельных файлов и выбор временного окна обработки. Далее осуществляется обработка радарограммы с применением различных процедур с целью выделения осей синфазности от отражающей границы [207].

Выбор количества опорных точек, а также их расположение зависит от решаемых задач и ландшафтных ограничений на конкретном участке исследований. Нет необходимости распределения опорных точек в строгой геометрической регулярности по площади и привязке к профилям. Каждая точка наблюдений самостоятельная и имеет GPS привязку на местности, что позволяет в дальнейшем выполнять построение карт с одновременным учетом данных профилирования и углового георадиолокационного сканирования.

На приведенной для примера схеме на рисунке 6.2 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 минимизации погрешностей при картографировании идеальной считается организация равномерной, изотропной сети наблюдений. Однако в полевых условиях доминирующим ограничением выступает физическая проходимость местности. Следовательно, применение УГС сводится не к формальному соблюдению сетки, а к обоснованному выбору размещения опорных точек, данные с которых обеспечат более равномерную интерполяцию данных.

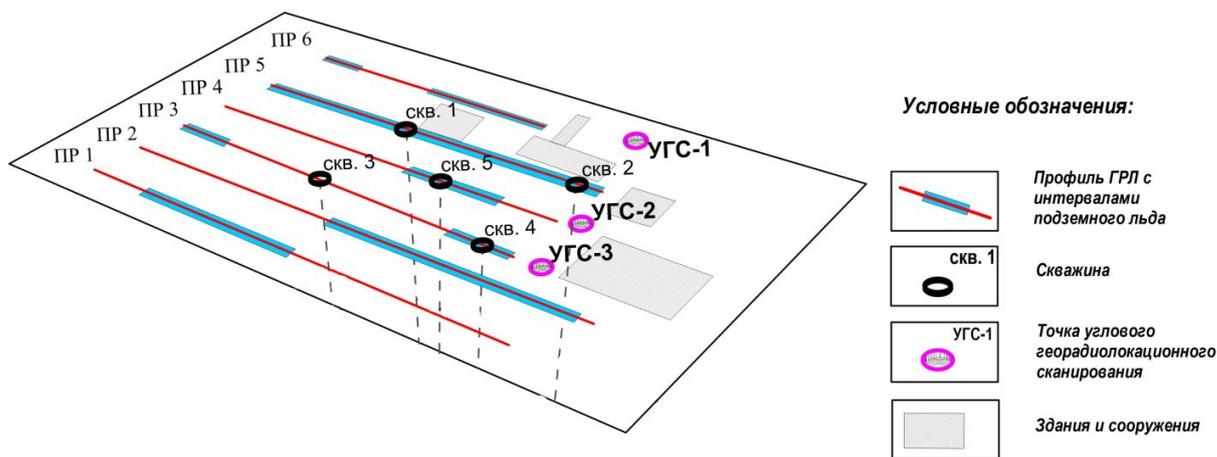


Рисунок 6.2 – Схема георадиолокационных исследований при картировании структурных неоднородностей массивов многолетнемерзлых горных пород с использованием УГС в опорных точках в условиях пересеченной и ограниченной местности, где профилирование невозможно [53, 124]

Описанная методика успешно применена на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь для выявления водоносного горизонта и кровли коренных пород. Исследования выполнены георадаром «ОКО-2» с моноблочным антенным блоком 250 МГц [65]. Данные георадиолокации из двух точек зондирования сопоставлены с геологией ближайшего шурфа. В результате методика углового георадиолокационного сканирования обеспечила повышение информативности исследований строения горного массива в сложных условиях действующего месторождения.

## 6.2 Скважинная георадиолокация

При решении задач изучения криогенного состояния грунтов оснований горнотехнических сооружений, когда доступ с поверхности ограничен, предлагается в комплексе геофизических исследований использование скважинной георадиолокации. Скважинный георадар является полезным инструментом для решения геокриологических задач, т.к. обнаруживает изменения электрических свойств в многолетнемерзлых горных породах по вариации скорости георадарного сигнала. От скорости можно перейти к значениям вещественной части диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ). При перемещении георадара по скважине также регистрируется амплитуда георадиолокационного импульса, которая изменяется в зависимости от затухания в толще горных пород. Применение

скважинной георадиолокации оптимально в стесненных условиях, когда профилирование выполнить невозможно, но имеется скважина для контроля за температурой грунтов либо есть возможность пробурить ее. Такие места могут быть под сооружениями или в непосредственной близости к ним.

Для выполнения георадиолокации из скважины необходимо, чтобы она не имела металлической обсадки для уменьшения количества сигналов-помех, возникающих при многократном отражении электромагнитных волн от стенок скважины. Для таких измерений подходит специализированный прибор – скважинный георадар с линейными дипольными антеннами (например, георадар «ОКО-2»). Погружение георадара в скважину проводится лебедкой, обеспечивающей равномерное перемещение антенного блока по скважине. Глубина погружения регистрируется на компьютере по датчику, закрепленному на спускном тросе, при этом на радарограмме в процессе записи желательно выставлять соответствующие метки с равномерным шагом в зависимости от глубины, например, 1 м для более корректной привязки сигналов к геологическим слоям [124].

В полевых условиях для исследований на небольшую глубину (например, при обследовании фундаментов строений и инженерно-технических сооружений – до 6-12 м), а также когда нет возможности использовать лебедку, в подготовленную скважину георадар опускается вручную (рисунок 6.3).

При погружении георадара желательно сохранять постоянную ориентацию антенн в сторону сваи. Георадиолокационная съемка осуществляется как при опускании, так и при подъеме георадара. Привязка по глубине проводится исходя из известной глубины скважины, равномерной скорости перемещения георадара и меток на удерживающем стержне. На представленном рисунке 6.3 данными скважинной георадиолокации удалось установить глубину забивки сваи – около 4,3 м. На радарограмме отражение от сваи плохо прослеживается в толще сезонно-талого слоя. Наиболее интенсивные отражения от нее наблюдаются примерно с 3 м. Начиная с 3,2 м, ось синфазности сигналов от сваи смещается из-за уменьшения времени прохождения сигналов по мерзлым грунтам и прослеживается по

высокоамплитудным отражениям до самого конца сваи на глубину до 4,3 м. Таким образом, с использованием скважинного георадара удалось установить глубину забивки сваи и определить мощность сезонно-талого слоя.

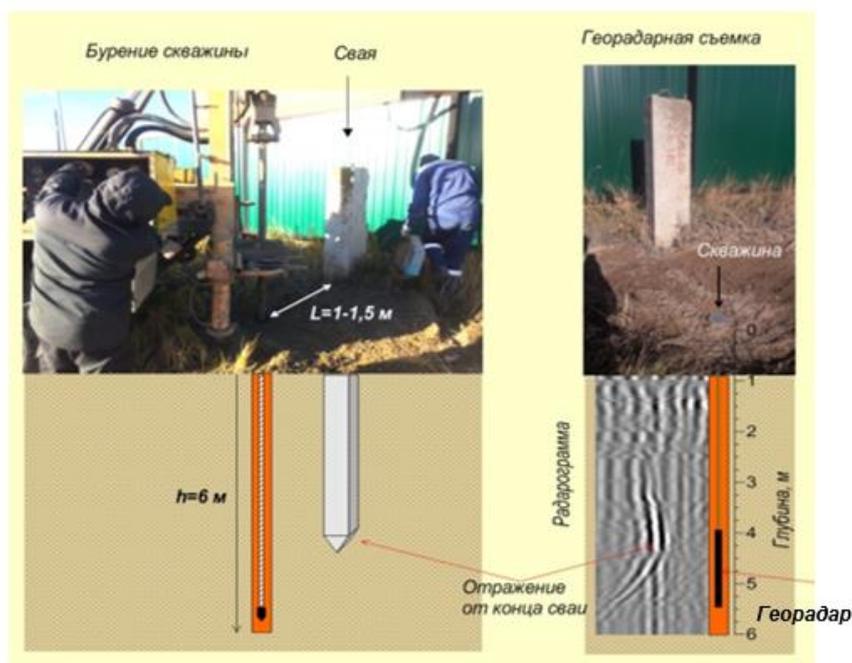


Рисунок 6.3 – Скважинная георадиолокация при исследовании свайного фундамента

Метод георадиолокации позволяет оценивать затухание электромагнитных волн по амплитудам сигналов и получать сведения о диэлектрической проницаемости пород ( $\epsilon'$ ) на основании информации о скорости распространения электромагнитных волн в среде. Определение скорости электромагнитных волн при зондированиях с поверхности земли осуществляется программными процедурами по годографу, построенному при измерениях на переменной базе, а также по гиперболическому образу от дифрагирующего объекта в толще пород. При георадиолокационном обследовании горизонтально-слоистого массива из скважины применение данных методик затруднительно, так как в такой среде отсутствуют вертикальные отражающие границы, а наличие дифрагирующих объектов маловероятно. В данном случае целесообразно определять скорость по параметрам поверхностной волны (на самых ранних временных задержках), прошедшей в разных слоях пород, а затем определить свойства ( $\epsilon'$ ) слоев по глубине.

Для апробации данного подхода были проведены опытные работы по георадиолокации из скважины, заполненной водой [167]. При измерениях применялась специально подготовленная аппаратура с модернизированной системой синхронизации и удлинённым до 60 м кабелем передачи информации. Центральная частота приемника и передатчика составляла 50 МГц. В целях предотвращения всплытия и загибов модуля антенного блока к его нижней части были подвешен груз массой 4 кг. Погружение георадара в скважину с водой проводилось на территории научно-производственного предприятия геофизической аппаратуры «Луч» (г. Новосибирск), оснащенного необходимым для эксперимента оборудованием, в том числе лебедкой, обеспечивающей равномерное перемещение антенного блока по скважине.

Исследуемая георадаром скважина имеет глубину 60 м, асбестовая обсадка заканчивается на 40 м металлическим кольцом, далее диаметр скважины уменьшен. На поверхности скважина имеет металлическую обсадку высотой 0,4 м и глубиной 0,5 м до начала асбестовой обсадки. Уровень воды находится в 3-х метрах от поверхности. Схема эксперимента изображена на рисунке 6.4.

Георадиолокационные сигналы записаны с момента полного погружения антенного блока (АБ) в воду. Глубина погружения регистрировалась на компьютере по датчику, закреплённому на спускном тросе, а на радарограмме выставлялись соответствующие метки, через 5 м: М1 – 5 м, М2 – 10 м, М3 – 15,3 м, М4 – 19,9 м, М5 – 24,9 м, М6 – 30 м. Датчик глубины погружения находится от АБ примерно в 0,5 м, а условная точка приема сигнала расположена посередине АБ – 2,5 м. Таким образом, отставание показаний датчика от точки приема составляет 3 м. Эта поправка учтена при обработке данных, начало файла с 5 м, окончание на 34 м. В качестве априорной информации о геоэлектрическом разрезе использовались данные индукционного каротажа ВИКИЗ, полученные ранее специалистами ЗАО НПП ГА «ЛУЧ». Каротаж методом ВИКИЗ дает возможность определить удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород, значение которого существенно зависит от их литологического состава.

Так, например, УЭС песков значительно выше, чем сопротивление глинистых разностей, а максимальным сопротивлением обладают массивные плотные породы. На рисунке 6.5 показаны каротажные диаграммы ВИКИЗ и их геологическая интерпретация.

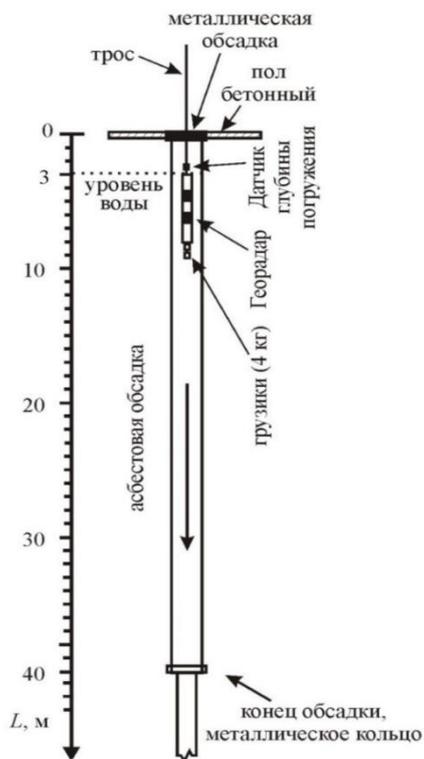


Рисунок 6.4 – Схема экспериментальных георадиолокационных зондирований в скважине с водой

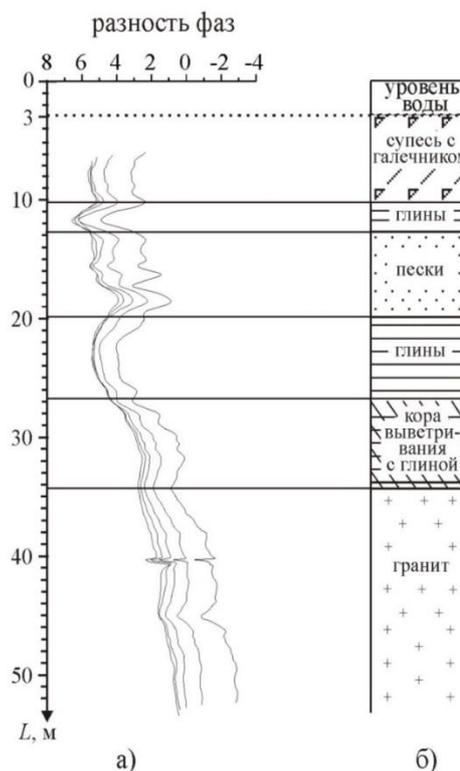


Рисунок 6.5 – Каротажные диаграммы ВИКИЗ тестовой скважины (а) и их геологическая интерпретация (б)

На рисунке 6.6а представлен георадиолокационный разрез, полученный в тестовой скважине. На радарограмме наблюдается изменение по профилю времени задержки, амплитуды и частотных составляющих сигналов. Начальным временам радарограммы соответствуют сигналы поверхностной волны, прошедшие от передатчика до приемника по породе, прилегающей к обсадке скважины. По параметрам этих сигналов можно оценить свойства пород околоскважинного пространства: по амплитудам – электрическую проводимость, по времени задержки – диэлектрическую проницаемость.

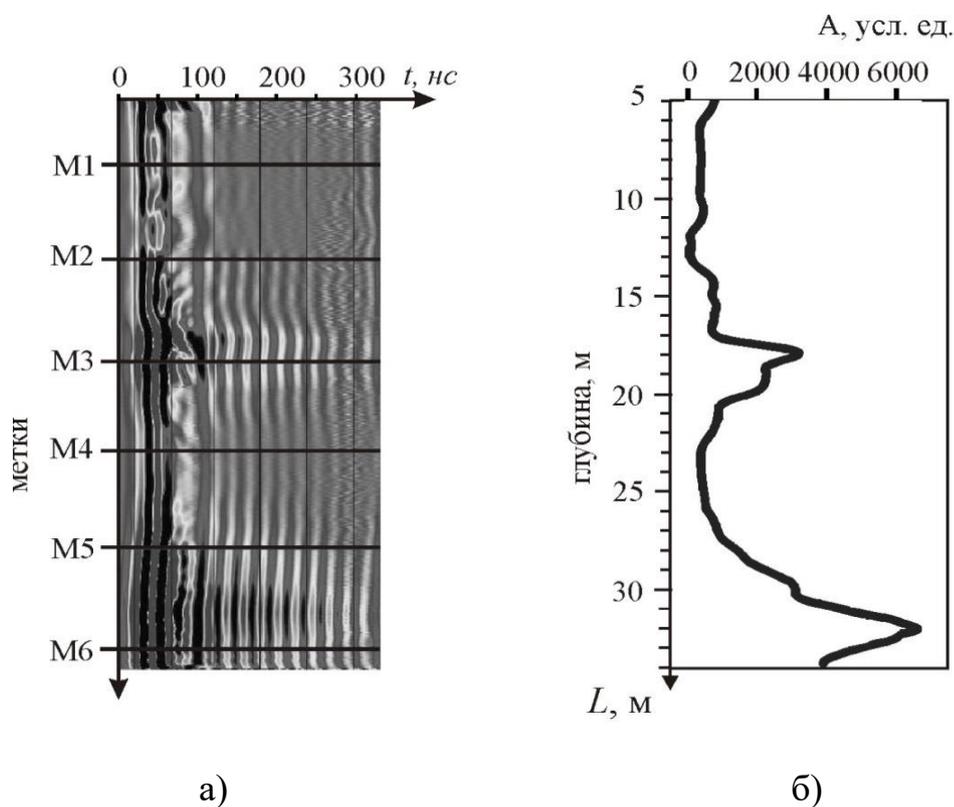


Рисунок 6.6 – Данные георадиолокационного обследования скважины:  
 а – георадиолокационный разрез по скважине; б- график амплитуды поверхностного сигнала георадара

На рисунке 6.6б представлен график изменения амплитуды поверхностного сигнала по профилю. На этом графике выделяются три области амплитудных максимумов. Первый на глубине с 5 до 7 м (супесь с галечником), второй - с 17 до 20 м (пески), третий - с 26 до 34 м (кора выветривания с глиной).

График изменения амплитуд поверхностного георадиолокационного сигнала практически синхронно повторяет основные изменения графика разности фаз ВИКИЗ, пропорционального проводимости среды. Таким образом, амплитуда сигнала поверхностной волны напрямую зависит от удельного электрического сопротивления пород.

По времени задержки  $t$  георадиолокационных сигналов согласно формуле  $v = \frac{S}{t}$  определяется скорость распространения сигналов. При расчетах по сигналам поверхностной волны значение  $S$  – это расстояние от передатчика до приемника. Далее по зависимости  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$  рассчитывается диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$ .

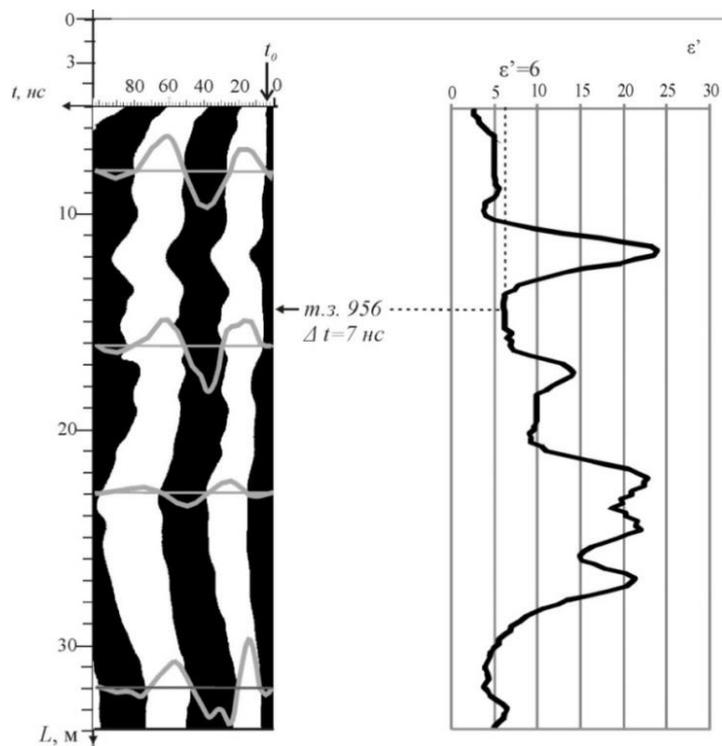


Рисунок 6.7 – Определение диэлектрической проницаемости пород околоскважинного пространства по данным георадиолокации

Подобные расчеты  $\epsilon'$  пород по данным измерений в скважине проведены для демонстрации возможностей георадиолокации. Полученные расчетные значения  $\epsilon'$  являются приближенными, т.к. они зависят от значения скоростей, точность определения которых была невысока из-за трудности точной регистрации момента вступления волны. Эти трудности в дальнейшем могут быть решены методически.

До расчетов проведена обработка данных, заключающаяся в установке нулевого отсчета времени и высокочастотной (свыше 10 МГц) фильтрации сигнала, для устранения низкочастотной составляющей спектра, возникающей при контакте АБ с водой. Ноль отсчета времени принят по времени вступления волны в точке зондирования №956 при прохождении по песку ( $S=0,9\text{ м}$ ,  $\epsilon'=6$ ,  $v=0.122\text{ м/нс}$ ,  $t=7\text{ нс}$ ).

Время вступления сигналов поверхностной волны в каждой точке зондирования рассчитаны по линии  $t_0$ , по времени первой смены фаз. График расчетных значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  приведен на рисунке 6.7.

На рисунке 6.8а показано геологическое строение разреза по данным бурения и каротажа ВИКИЗ, а также приведены графики УЭС пород, потенциала

собственной поляризации (ПС), амплитуды сигнала поверхностной волны и диэлектрической проницаемости [167]. Сопоставление и анализ графиков показывает, что в интервалах залегания глин, характеризующихся пониженными значениями  $\rho$  и повышенными  $\Delta U$ , наблюдается уменьшение амплитуды сигнала поверхностной волны, а расчетные значения  $\epsilon'$  равны  $\sim 20$ , что характерно для глинистых пород. В песках и коре выветривания гранитоидов рост УЭС сопровождается возрастанием амплитуды электромагнитного сигнала, а диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon'$ ) определена равной  $\sim 6$ .

В целом графики УЭС и амплитуды сигнала, а также диэлектрической проницаемости и потенциала ПС хорошо коррелируют между собой. Таким образом, сопоставление данных ВИКИЗ и георадиолокации показало, что изменение амплитуды сигнала поверхностной волны по глубине прямо коррелирует с изменением удельного электрического сопротивления пород околоскважинного пространства. Установлена возможность оценки значений  $\epsilon'$  пород по изменению времени задержки сигналов поверхностной волны. Рассчитанные значения  $\epsilon'$  близки к табличным значениям диэлектрической проницаемости пород, слагающих исследуемый разрез.

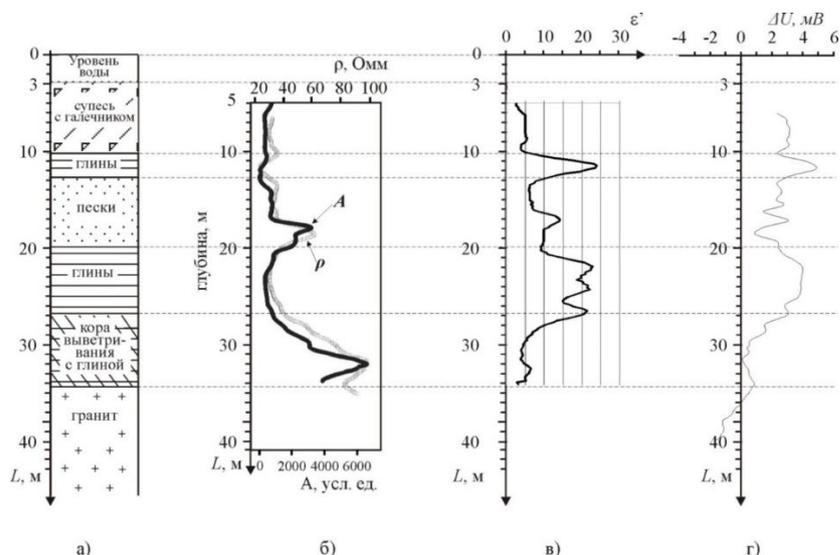


Рисунок 6.8 – Сопоставление результатов геофизических исследований в обводненной скважине:

*а* - геологическая колонка; *б* - диаграммы УЭС и амплитуды поверхностного сигнала; *в* - диаграмма диэлектрической проницаемости, рассчитанная по данным ГРЛ; *г* - диаграмма потенциала собственной поляризации

Проведенные исследования показали перспективность применения георадиолокационного каротажа в обводненных скважинах в спектре частот 10÷100 МГц при оценке электрофизических свойств массивов горных пород. При этом по сигналу поверхностной волны можно судить о литологическом составе пород, а расчёт диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  позволяет снизить неоднозначность интерпретации каротажных данных [167].

### **6.3 Технология выявления участков развития опасных криогенных процессов**

#### **6.3.1 Исследование характеристик георадиолокационных сигналов при зондировании массивов горных пород различного криогенного состояния**

Рассмотрим результаты полевых экспериментов, проводившихся георадиолокационным зондированием при исследовании рыхлых отложений. Один из экспериментальных участков расположен в зоне техногенно-нарушенных грунтов – в пределах свайного фундамента эксплуатируемого строения. Второй участок расположен в районе оз. Булгуннях. Здесь верхняя часть разреза по данным ЗМПШ, проводившемся ранее, характеризуется относительно большей электропроводностью, обусловленной суглинком, супесью и талым состоянием деятельного слоя.

Полевые работы проводились георадаром «ОКО», центральная частота антенного блока 150 МГц. Фрагмент результатов георадиолокационного зондирования на первом участке приведен на рисунке 6.9. Здесь, по форме графика сигнала, не традиционного для диэлектрических (радиолокационных) сред, выделена граница раздела двух пластов – верхнего проводящего, а нижнего – слабопроводящего.

Необычность формы графика заключается в смещении амплитудной оси колебательного процесса влево по рисунку (трасса 27, рисунок 6.9). В точке 6 (трасса 6) подобная граница не выделяется, смещение отсутствует, а рассматриваемая часть разреза, судя по затуханию поля (переходный процесс), относительно однородна и электропроводна. В точке трассы 27 ниже отмеченной

границы выделена слабоэлектропроводная (диэлектрическая) среда, соответствующая мерзлым пескам (затухающий процесс почти не заметен). Природа визуального смещения амплитудной оси пока не ясна, но, вероятно, она соответствует смене знака переходного процесса: в момент достижения электромагнитного поля диэлектрической среды начинается влияние частотной дисперсии (поля поляризации).

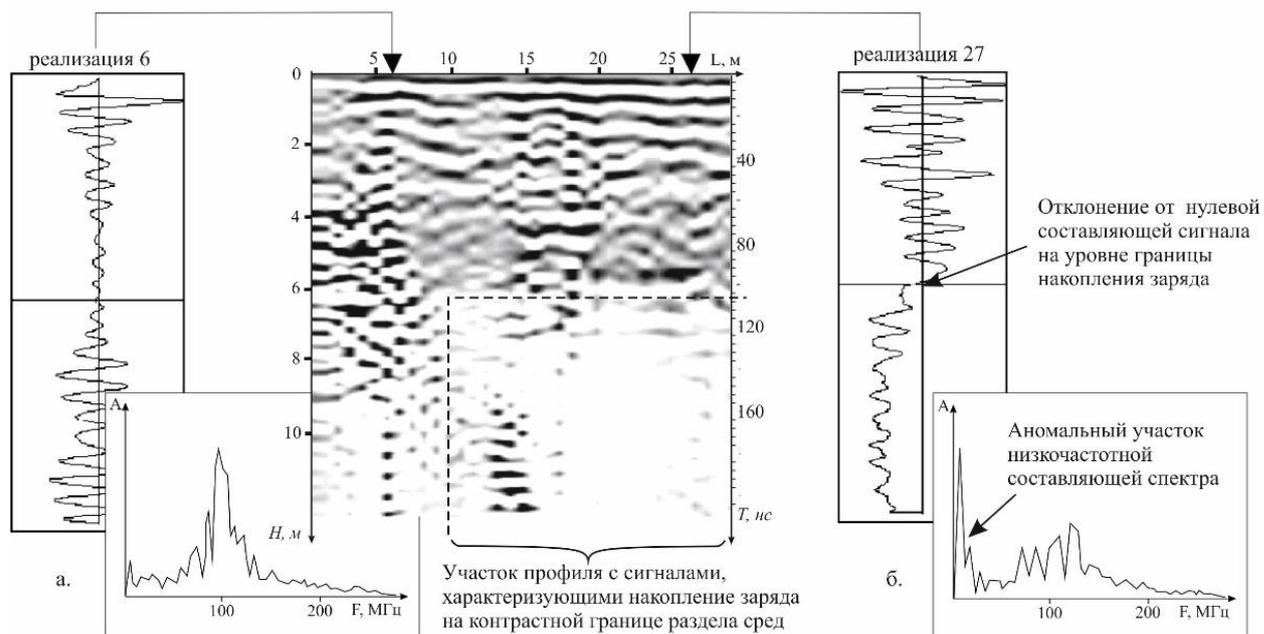


Рисунок 6.9 – Результаты георадиолокации по профилю с контрастной границей раздела сред с эффектом накопления заряда

Данные георадиолокационного зондирования на втором участке подтверждают особенности проявления границ разреза сред разной электропроводности в импульсном высокочастотном электромагнитном поле. К примеру, на рисунке 6.10 приведены результаты георадиолокации совмещенные с результатами картовочного бурения.

Согласно данным бурения до глубины шесть метров разрез представлен электропроводной геологической средой. Ниже этой отметки залегают мерзлые пески, отмечающиеся высоким электросопротивлением. Граница раздела между этими пластами отчетливо выделяется по амплитуде отраженного георадиолокационного сигнала, смещением амплитудной оси колебательного процесса в нижней части разреза и заметным затуханием электромагнитного поля

в талой зоне – признаки проявления степени электропроводности горных пород в высокочастотном импульсном поле. Отмеченная граница раздела, расчлененная по данным бурения, непрерывно прослеживается вдоль георадиолокационного профиля, что соответствует естественному строению рыхлых отложений.

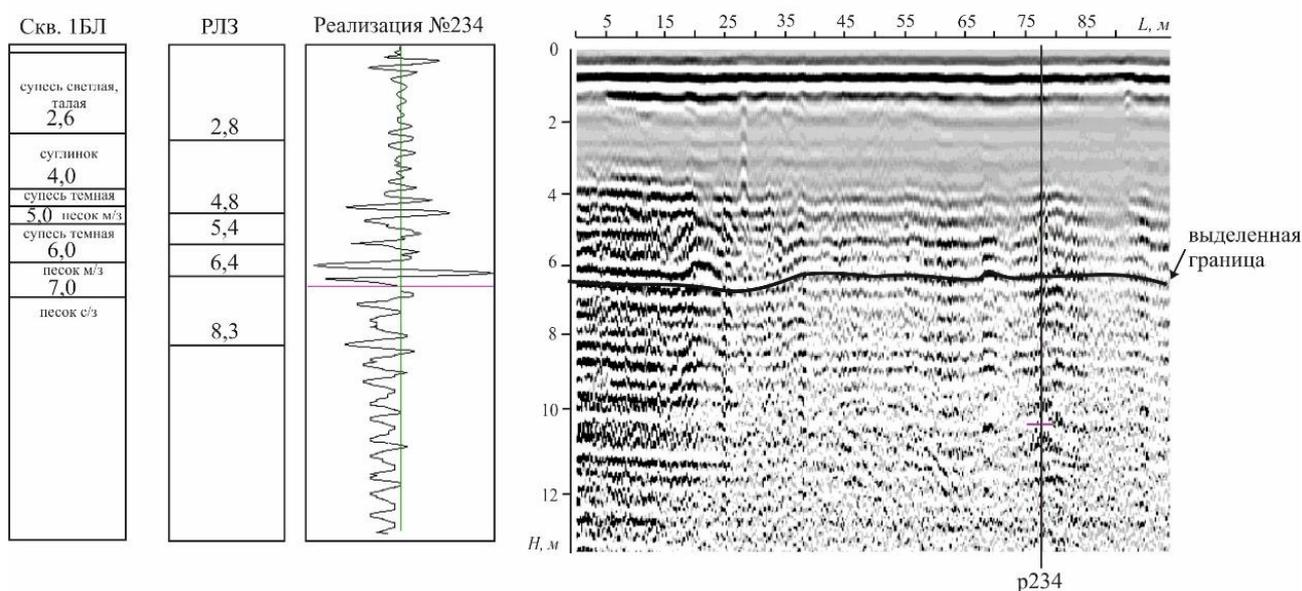


Рисунок 6.10 – Результат сопоставления данных георадиолокации и бурения

Таким образом, экспериментальными исследованиями выявлен эффект накопления заряда на контрастных границах раздела сред при георадиолокационном зондировании, который позволит выделять на георадиолокационном разрезе зоны повышенной и пониженной проводимости, а следовательно, проводить качественную и количественную оценку состояния исследуемой среды.

### 6.3.2 Физическое моделирование георадиолокации процесса оттаивания массива мерзлых горных пород

Исследования изменения характеристик георадиолокационных сигналов при процессе оттаивания массива мерзлых горных пород с включением пластового льда проведены по данным экспериментальных георадиолокационных зондирований в лабораторных условиях. Лабораторная установка собрана в виде деревянного короба (3\*1\*1,5 м), основанием которого является мёрзлый массив (рисунок 6.11а). Модель пластового льда представлена фрагментом речного льда

размерами  $1 \times 0,4 \times 0,72$  м, размещенным на дне короба (рисунок 6.11б). Лабораторная установка заполнена сыпучим, без смерзшихся комков и глыб речным песком, почти до верхней кромки, общей мощностью 1,44 м.

Исследования процесса оттайки пород модели проведены с конца апреля по июнь. Контроль изменения толщины модели, а также мощность слоя песка, перекрывающего лед, определялись в процессе оттайки щупом и измерительной рулеткой. По результатам контактных измерений рассчитывалась толщина таящего льда.

Георадиолокационные измерения проведены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1200 (центральная частота 1200 МГц). Исследование пород модели проводилось методикой профилирования (рисунок 6.11в). Для замера пройденного пути был использован встроенный датчик перемещения.

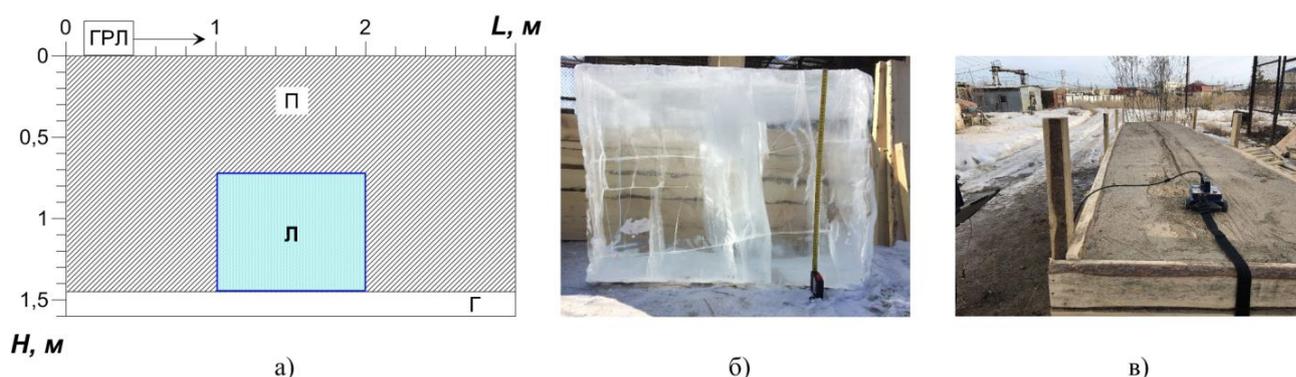


Рисунок 6.11 – Схема массива мёрзлых пород (а) с включением пластового льда (б) (П – песок, Л – лёд, Г – грунт) и процесс георадиолокационных измерений георадаром (ГРЛ) «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1200 (в)

На основе наблюдений за оттайкой пород построены графики изменений в модели за весь период исследований (рисунок 6.12).

В апреле толщина слоев модели не изменялась, породы были мерзлыми. В период с 7 мая по 30 июня наблюдалось уменьшение общей толщины модели от 1,44 м до 1,15 м (рисунок 6.12, сплошная линия). Просадка модели произошла за счет вытаявания льда от 0,72 м до 0,11 м (рисунок 6.12, пунктирная линия). Несоответствие глубины просадки общей модели (0,29 м) и мощности вытаявания льда (0,61 м) объясняется медленным процессом растепления пород, в результате которого, образующееся при вытаявании льда поровое пространство постепенно заполнялось песком под действием собственного веса.

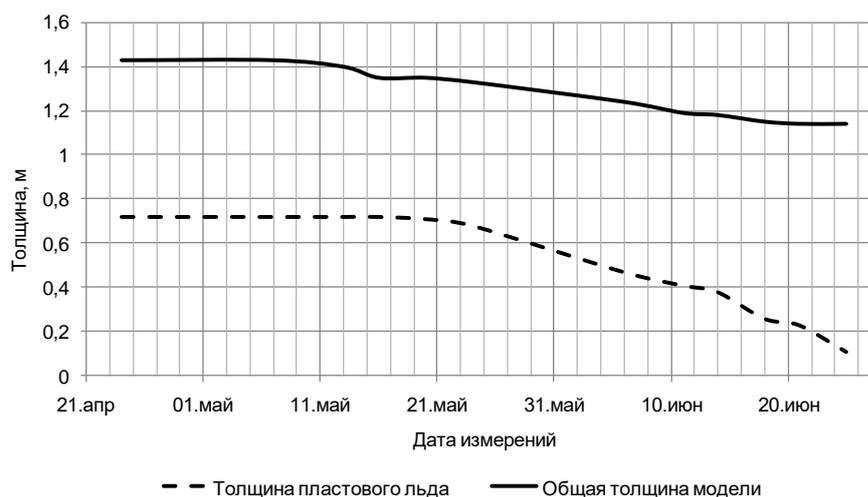
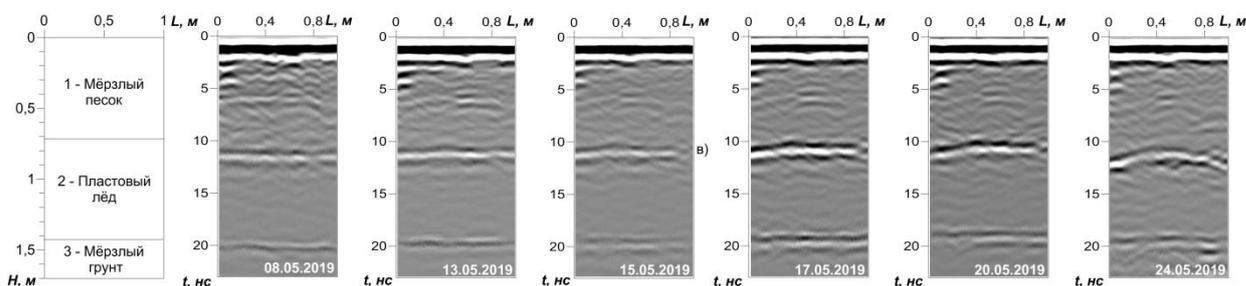


Рисунок 6.12 – Изменения в модели массива мёрзлых пород в процессе оттайки

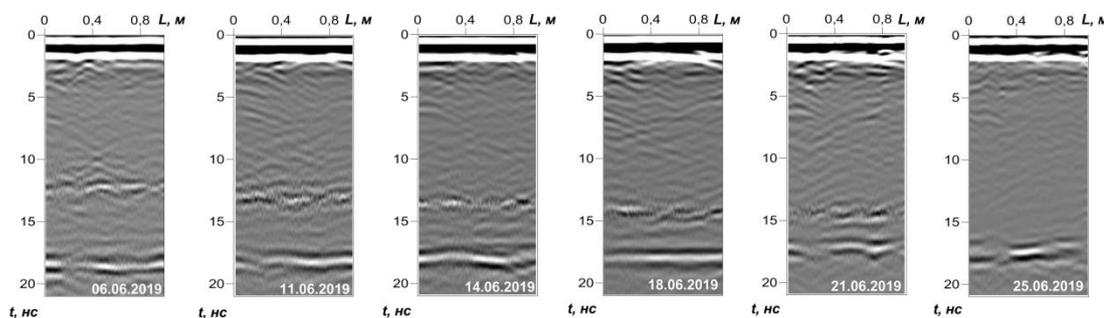
На рисунке 6.13 представлены радарограммы, полученные в результате георадиолокационного профилирования с поверхности модели. На всех радарограммах, состоящих из совокупности георадиолокационных трасс, прослеживаются протяженные оси синфазности сигналов, отраженных от границ слоев модели: «мёрзлый песок – лёд» и «лёд – мёрзлый грунт».



а) схема модели

б) фрагменты радарограмм, полученные в мае 2019 г.

мерзлых грунтов



в) фрагменты радарограмм, полученные в июне 2019 г.

Рисунок 6.13 – Схема модели массива мёрзлых пород (а) и результаты георадиолокационного профилирования (радарограммы) (б, в)

Данные показали, что при оттайке модели массива мёрзлых пород наблюдаются изменения характеристик георадиолокационных сигналов. Среднее значение скорости распространения георадиолокационного сигнала в песке ( $V_{п}$ ) варьирует от 0,125 м/нс до 0,150 м/нс, а средние значения  $\epsilon'_{п}$  от 4 до 5,8. Значение  $V_{л}$  изменяется в пределах 0,140-0,168 м/нс, соответственно  $\epsilon'_{л}$  – 3,2-4,6.

В процессе оттайки модели массива мёрзлых пород наблюдается снижение скоростей распространения сигналов по 3-м интервалам. В первом интервале скорость распространения сигнала в мёрзлых породах составила 0,15 м/нс. Во втором интервале прослеживается тенденция уменьшения скорости от 0,149 м/нс до 0,128 м/нс, что указывает на процесс оттайки мёрзлых пород. В третьем интервале зафиксировано полное оттаивание массива пород при скорости 0,128 м/нс. При этом влажность грунтов по ГОСТу 5180-2015 [28] составила 5%. Значения  $V_{п}$  для песков с такой влажностью в целом соответствуют результатам лабораторного эксперимента, изложенного в разделе 4.1.

При оттайке модели массива мёрзлых пород с включением пластового льда с апреля по июнь выполнен анализ спектров отражённых волн на границе песок-лёд. Спектры сигналов по данным на разные даты представлены на рисунке 6.14. В период оттайки пород модели с 8 мая по 21 июня зафиксировано смещение центральной частоты спектра с 1000 МГц до 625 МГц. Как видно, при увеличении влажности песка в процессе оттайки, происходит смещение центральной частоты спектра отраженного сигнала в низкочастотную область.

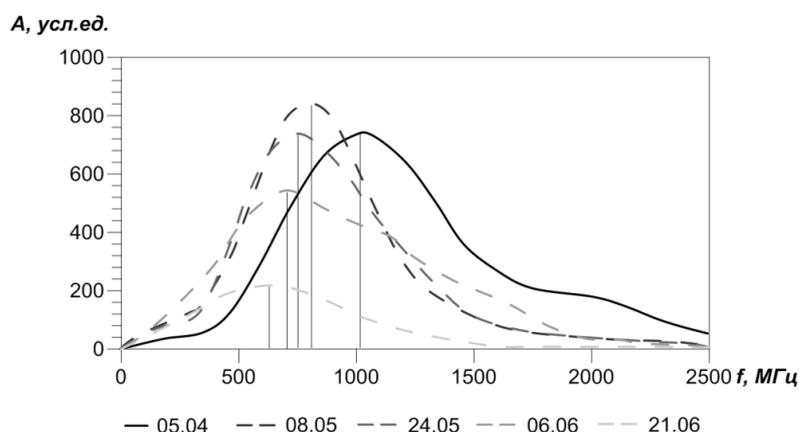


Рисунок 6.14 – Спектры сигналов, отраженных от границы «песок – лёд»

Анализ спектров сигналов, полученных при толщине льда ( $H_{\text{л}}$ ) от 0,72 м до 0,11 м (рисунок 6.14), показывает различную форму огибающей Фурье-спектра. Установлено, что спектр георадиолокационных сигналов от пластового льда имеет «изрезанную» форму (рисунок 6.15).

Согласно [187], при георадиолокации, слой электрически менее плотного непоглощающего вещества внутри более плотного непоглощающего можно рассматривать как режекторный гребенчатый фильтр, у которого «зубья» режекции расположены на частотах  $k/\Delta t$  (где  $\Delta t$  – двойное время прохождения электромагнитной волны во льду;  $k=0, 1, 2 \dots$ ). В данном случае в качестве гребенчатого режекторного фильтра выступает слой пластового льда внутри песка. При этом, количество максимумов на огибающей спектра (параметр «изрезанности») зависит от толщины льда.

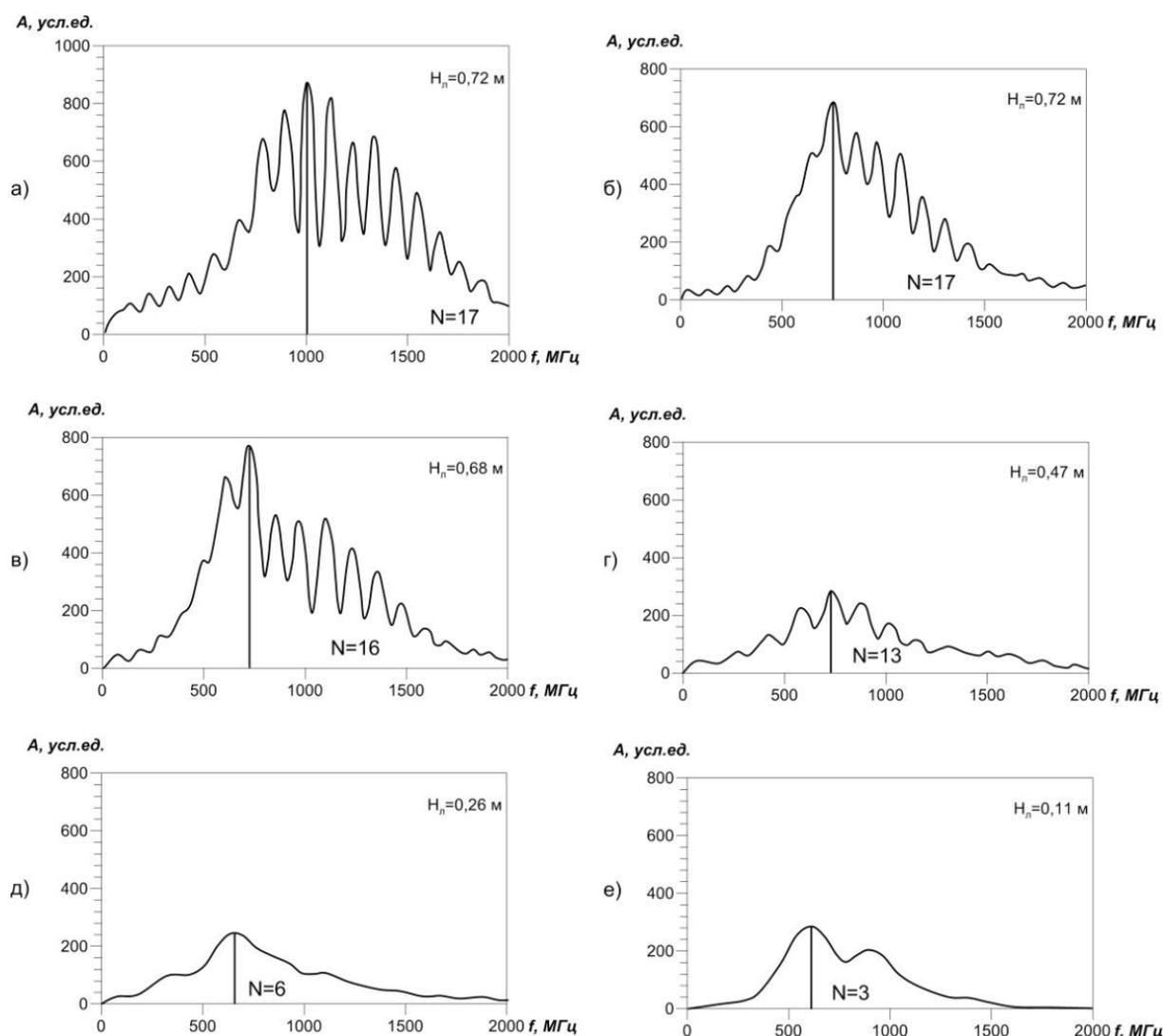


Рисунок 6.15 – Спектры георадиолокационных сигналов при таянии пластового льда

По данным исследований для льда в исходном состоянии ( $H_{\text{л}}=0,72$  м,  $\Delta t=8,62$  нс) имеем  $1/\Delta t=114$  МГц. При ширине диапазона спектра частот 2000 МГц для используемого антенного блока (1200 МГц) на Фурье-спектре георадиолокационной трассы (рисунок 6.15а) наблюдается  $N=2000/114\approx 17$  максимумов. Как видно на рисунке 6.15 с уменьшением толщины льда количество максимумов ( $N$ ) снижается.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что процесс оттайки мерзлых пород отображается в георадиолокационных волновых полях изменением кинематических и спектральных характеристик отраженных сигналов. Одним из георадиолокационных признаков для мониторинга оттайки горных пород могут выступать спектральные характеристики сигналов. Так, смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов в низкую область характеризует увеличение незамерзшей воды в породе, то есть процесс оттайки. Уменьшение толщины слоя подземного льда при оттайке можно оценить по уменьшению «изрезанности» огибающей Фурье спектра георадиолокационных сигналов. Необходимо учитывать, что данные признаки установлены для дисперсных пород.

### **6.3.3 Методика георадиолокационных наблюдений в режиме мониторинга**

Методика реализации георадиолокационных наблюдений в режиме мониторинга схематично представлена на рисунке 6.16. Согласно разработанной методике на начальном этапе производится привязка профилей, проводятся рекогносцировочные георадиолокационные измерения на исследуемом участке. По результатам измерений производится настройка параметров сканирования (развертка, накопление сигналов, шаг между трассами и режимы измерений). Выполняются полевые работы методом георадиолокации в вариантах зондирования или профилирования для получения исходного разреза. Далее реализуются режимные наблюдения на участке негативных криогенных процессов для получения контрольных разрезов. В ходе мониторинговых исследований

должны соблюдаться повторяемость параметров сканирования (неизменные условия генерации и регистрации сигналов) и периодичность измерений. Объемы, периодичность, длительность измерений определяются в соответствии с поставленными целями и задачами мониторинга (зависят от геокриологических объектов, процессов и явлений). Можно выделить разносезонные измерения. В этом случае исследования проводятся в два этапа. Первый этап – в период максимального промерзания грунтов (март-апрель) и второй этап – в период максимальной оттайки грунтов (сентябрь-октябрь). Также для мониторинга контролируемых параметров георадиолокации необходимо проведение ежегодных измерений. Методика их проведения заключается в непрерывном наблюдении за изменениями параметров георадиолокации.

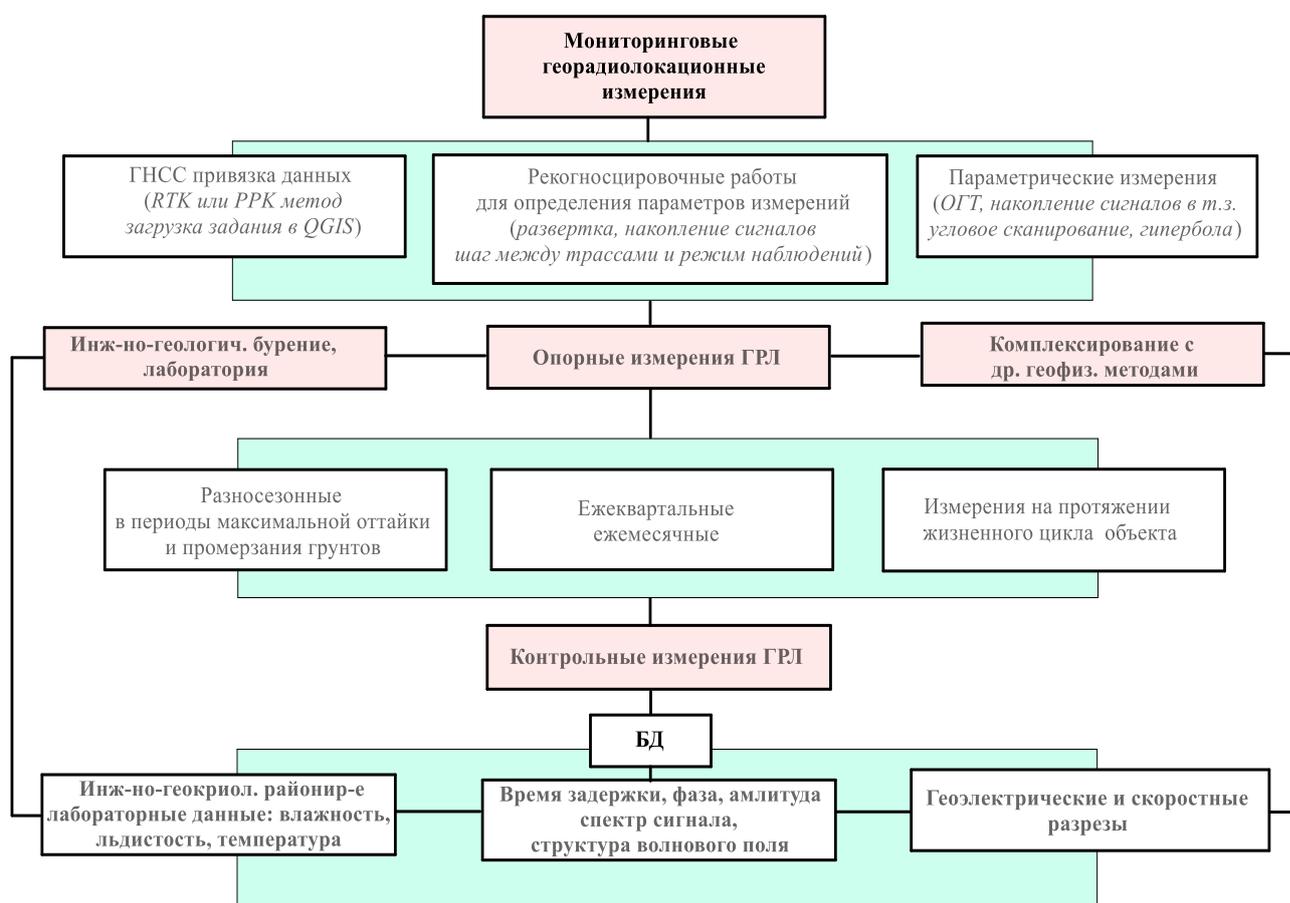


Рисунок 6.16 – Схема реализации георадиолокационных мониторинговых наблюдений

Для достоверного сравнительного анализа георадиолокационных параметров и точного позиционирования локальных неоднородностей с сантиметровой точностью методика доработана в части привязки данных к местности. Для

решения этой задачи апробирован геодезический приемник «Geobox Fora Smart», предназначенный для решения широкого спектра задач, связанных с высокоточными (геодезическими) GNSS измерениями. Приемник интегрируется с георадаром по интерфейсам Bluetooth, RS-232 или USB.

Получение дифференциальных поправок и уточнение координат, производится как в реальном времени (RTK), так и в постобработке (PPK). Методика PPK съемки выглядит следующим образом:

- георадиолокация по профилю;
- запись измерений (raw data);
- конвертация измерений (raw data) в RINEX;
- обработка данных;
- получение георадиолокационного трека;
- загрузка трека в базу данных мониторинговых измерений.

Для сбора полевых данных используется программа георадара «ОКО» «GeoScan32», а также программа, поставляемая с GNSS приёмником «ReachView3». Постобработка данных производится в программе RTKLib. Апробированная методика PPK привязки данных георадиолокации показала максимальную точность решения в плане 2 см и минимальную до 30 см.

В результате разработан программно-методический комплекс (рисунок 6.17), реализующий методику режимных георадиолокационных наблюдений, интегрирующий и обеспечивающий взаимодействие программного обеспечения для обработки данных георадиолокационных измерений, базы данных (БД) и геоинформационной системы (ГИС). Комплекс включает БД со специализированной структурой, позволяющей хранить данные измерений, GPS-привязки, фото, видео, а также данные бурения скважин и пр., а также ГИС с разработанными модулями импорта, обработки, анализа и визуализации данных георадиолокации.

Исходные данные, полученные по разработанной методике георадиолокационных измерений, проходят предварительную обработку. Для этого возможно использование одной или нескольких специализированных

программ обработки георадарных данных (GeoScan32, Analyze II, Георадар-Эксперт). Предварительная обработка проводится для выявления информации о строении и свойствах массива горных пород, в том числе для определения опорной границы и времени задержки сигналов, отраженных от нее.

#### Программно-методический комплекс



Рисунок 6.17 – Основные элементы программно-методического комплекса и направления передачи информации между ними

Для структурированного хранения мониторинговых георадиолокационных данных и результатов их предварительной обработки разработана специализированная структура база данных на основе БД PostgreSQL 9.6.6, позволяющая хранить дату, время и место (координаты GPS) получения каждой георадиолокационной трассы; времена задержки сигнала, отраженного от опорной границы в весенний и осенний периоды; коэффициент  $\alpha$ , определяемый по результат бурения скважины; результаты определения влажности горных пород термостатно-весовым методом. База данных позволяет визуализировать результаты мониторинговых измерений и систематизировать их по различным параметрам. Систематизированные мониторинговые данные представляются в виде дерева каталогов в ГИС-формате, с помощью «Data uploader», разработанного модуля PostgreSQL для экспорта данных георадиолокации.

Для наиболее эффективной интеграции базы данных в геоинформационную систему выбран программный продукт QuantumGIS, позволяющий оптимизировать наиболее важный и трудоемкий этап интеграции базы данных – структуризацию и формализацию атрибутивной таблицы (рисунок 6.18), которая импортируется в ГИС и привязывается к GPS-маршруту георадиолокационного зондирования. На основе информации атрибутивной таблицы рассчитываются и визуализируются графики распределения влажности по профилю, а также выявляются и картируются локальные неоднородности.

Для обеспечения возможности просмотра и редактирования георадиолокационных данных непосредственно из QuantumGIS, разработан программный модуль GeoScanLoader, позволяющий открыть необходимый файл в ПО GeoScan32 по элементу в дереве каталогов ГИС, поиск которого автоматическим образом проводится в БД.

The screenshot shows a database manager window titled 'Менеджер БД'. The main area displays a table with the following data:

gid	lat	lon	date	time	time1	time2	a	humidity
1	62.2041548230	117.1913002431	27.08.2015	5:43:30	40.5962100037265	52.8436587176424	0.65	14.41
2	62.2041667253	117.1912813000	27.08.2015	5:43:31	41.5433460376027	54.3460124265494	0.65	14.66
3	62.2041772027	117.1912653744	27.08.2015	5:43:32	42.3598426185304	54.950219896436	0.65	14.24
4	62.2041866742	117.1912462637	27.08.2015	5:43:33	43.1273494046025	53.8234546147557	0.65	12.27
5	62.2041979060	117.1912279911	27.08.2015	5:43:34	43.5519276266849	53.7907947515186	0.65	11.72
6	62.2042093892	117.1912138257	27.08.2015	5:43:35	44.0908153700972	55.1788389390957	0.65	12.41
7	62.2042191960	117.1911969781	27.08.2015	5:43:36	44.7113527716023	56.5668831266728	0.65	12.97
8	62.2042297572	117.1911804657	27.08.2015	5:43:37	45.4788595576743	57.4976892289305	0.65	12.94
9	62.2042408213	117.1911631990	27.08.2015	5:43:38	46.0993969591794	58.5101449892809	0.65	13.14
10	62.2042500414	117.1911457647	27.08.2015	5:43:39	46.8505738136329	59.6859000658168	0.65	13.33
11	62.2042584233	117.1911293361	27.08.2015	5:43:40	47.2261622408597	60.6820258945486	0.65	13.76
12	62.2042663861	117.1911146678	27.08.2015	5:43:41	47.6507404679421	60.8453252107341	0.65	13.45

Рисунок 6.18 – Окно менеджера базы данных с основной таблицей, заполненной данными георадиолокационных мониторинговых измерений

На рисунке 6.19 представлен результат апробации разработанного программно-методического комплекса при выявлении участков криогенных процессов в грунтах оснований водозащитной дамбы по данным георадиолокации.

На данном объекте режимные наблюдения проводились с июня по сентябрь 2017 г. По профилю исследований выделены локальные неоднородности, интерпретируемые в соответствии с разработанными признаками, как участки с пучением пород - I, повышенной влажности - II, зон суффозии – III, которые отображены в геоинформационной системе.

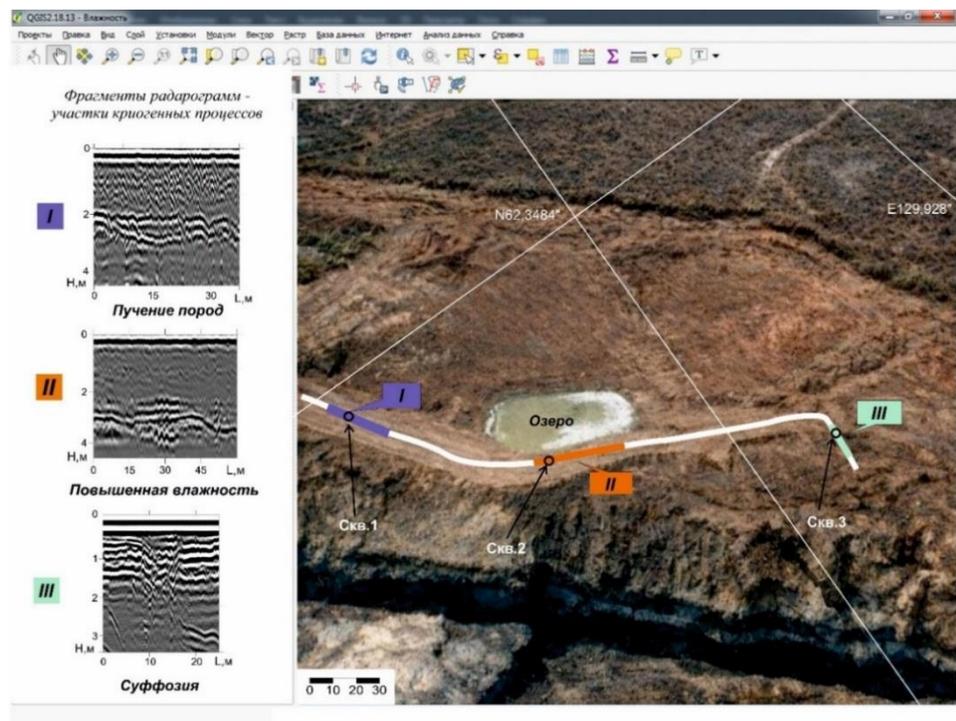


Рисунок 6.19 – Отображение участков криогенных процессов по георадиолокационному профилю дамбы в геоинформационной системе

На рисунок 6.20 представлен результат негативного влияния криогенных процессов на состояние водозащитной дамбы через 1 год.



Рисунок 6.20 – Разрушение южного борта дамбы в августе 2018 г.  
Фото предоставлено ведущим инженером ИГДС СО РАН Д.С. Козловым

Разработанная методика мониторинговых георадиолокационных измерений используется при многолетних (2012-2025гг) исследованиях криогенного состояния грунтов участка «Виллюйский тракт» [114, 115]. Георадиолокационные измерения на данном участке выполняются в непрерывном режиме с использованием георадара «ОКО-3» с антенным блоком АБ-250, позволяющего

изучать верхнюю часть грунтового массива до глубины 5 м. Антенный блок устанавливается на специальной транспортировочной установке, закреплённой на автомобиле (рисунок 6.21). Такая установка обеспечивает стабильное положение антенны и контакт с поверхностью. Далее георадар перемещается со скоростью 10–15 км/ч в прямом контакте с поверхностью, что обеспечивает стабильное качество получаемых данных. Для точной привязки точек измерений используется GPS-приёмник совместно с колесным датчиком перемещения «ДП-32».

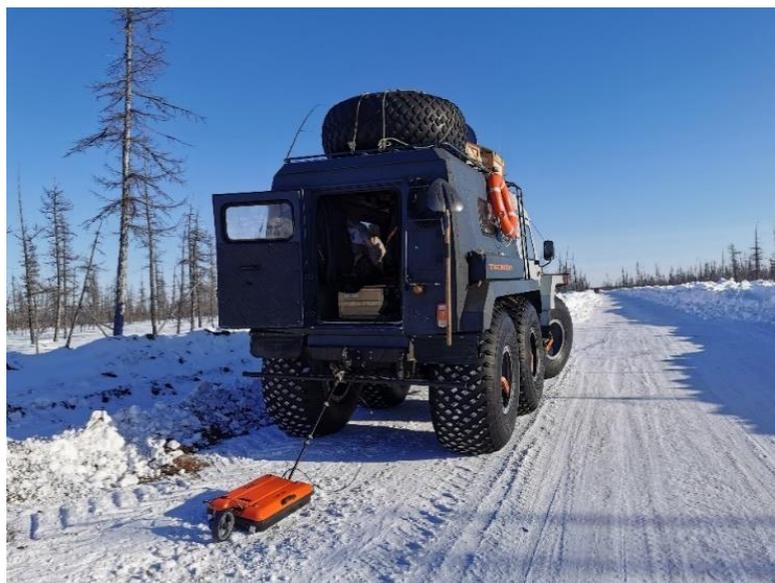


Рисунок 6.21 – Пример транспортировочной установки георадара «ОКО-3» при исследовании состояния грунтов автодороги

Во время измерений оператор георадара дополнительно устанавливает метки для привязки данных к местности (рисунок 6.22).

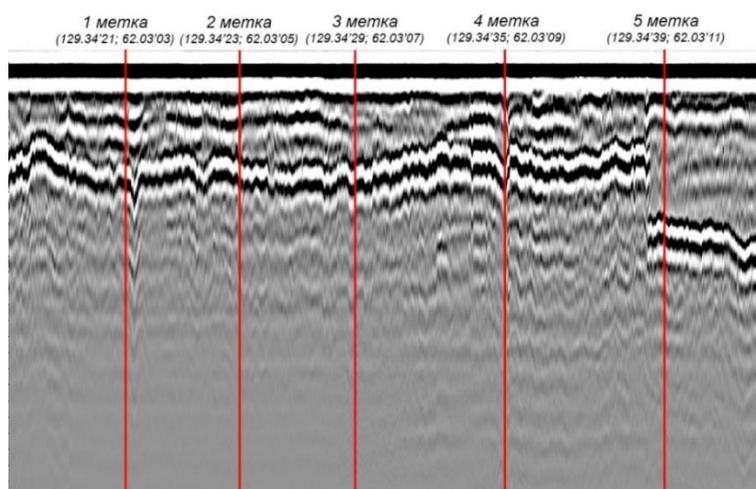


Рисунок 6.22 – Фрагмент георадиолокационных данных с привязанными метками

Мониторинговые измерения проводятся ежегодно в холодный период времени при максимальном промерзании грунтов (март-апрель) и в период максимальной оттайки (сентябрь-октябрь). Результаты георадиолокационных измерений хранятся в специализированной базе данных [115]. В ней содержится структурированная информация о материалах разносезонных георадиолокационных зондированиях. На рисунке 6.23 представлен пример мониторинга развития таликовой зоны по изменению структуры радарограмм на участке «Виллойский тракт» с 2012 г. по 2019 г.

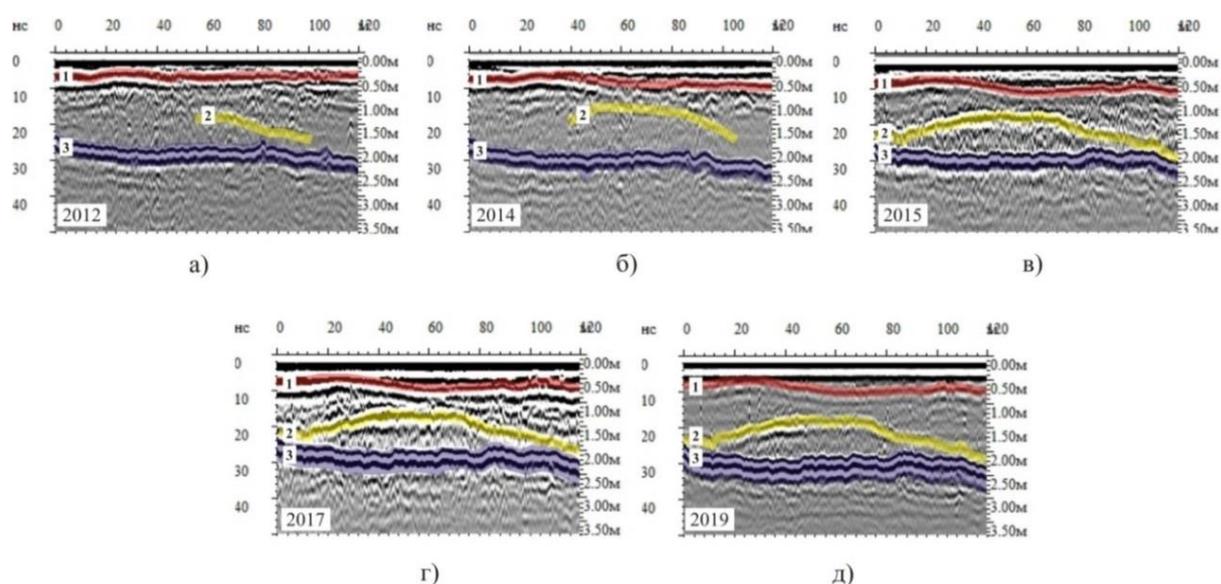


Рисунок 6.23 – Результаты мониторинговых георадиолокационных измерений с 2012 по 2019гг. Условные обозначения: 1 - граница дорожной одежды; 2 - дополнительная граница (аномальная зона); 3 - геологическое основание (опорная граница)

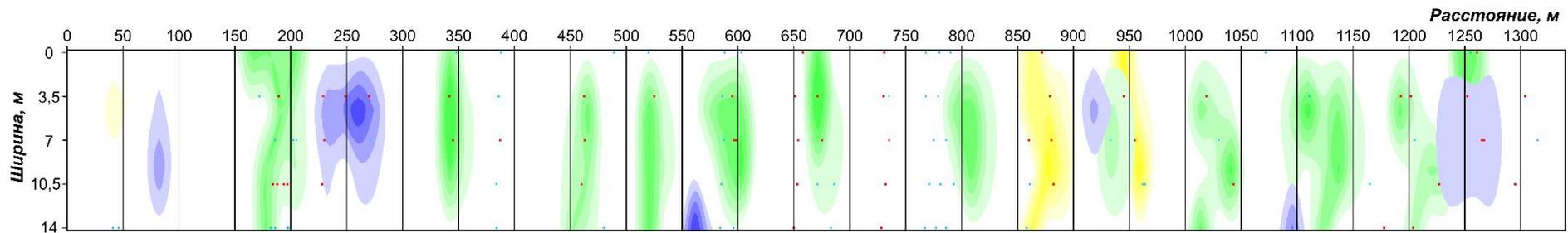
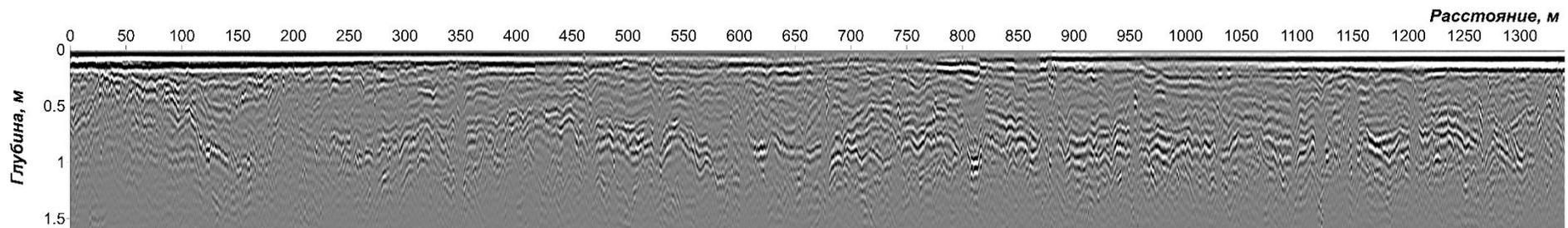
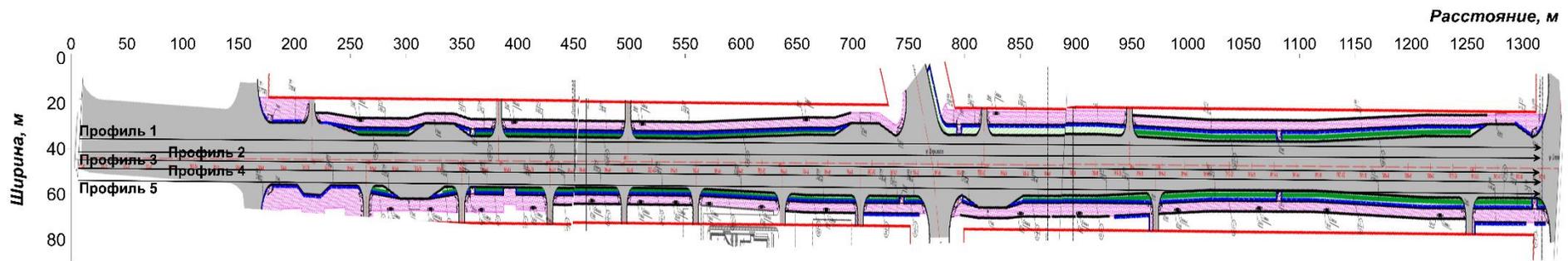
Данные георадиолокации по годам получены в холодный период времени, при максимальном промерзании грунтов. Исследуемый массив сложен до глубины 2 м насыпными грунтами песчано-гравийного состава [79]. На радарограммах выделены границы дорожной одежды (1) и геологического основания (3) [17]. Уже в 2012 г. в разрезе выделяется дополнительная граница (2), которая к концу 2019 г. образует замкнутый слой. Локальный участок имеет линзовидную форму и характеризует изменение свойств на границе мёрзлые и талые грунты. По результатам мониторинговых исследований установлено, что талые зоны уверенно выделяются при максимальном промерзании грунтов и на фоне отражений от горизонтально-слоистых границ конструктивных слоев дорожной одежды [166].

По данным визуальных наблюдений на участке выделенной таликовой зоны зафиксировано увеличивающееся разрушение поверхности.

Пример георадиолокационного выделения участков опасных криогенных процессов представлен результатами исследований на участке автомобильной дороги с провалами (рисунок 6.24а). Ранее разрушения были зафиксированы еще в 1994 г. и в 2011 г. Образовавшиеся ямы были засыпаны скальным грунтом. Было установлено, что места формирования провалов и разрушений соответствуют трассе залегания трубопровода [182], и происходят в результате негативных явлений: обводнение территории, оттайка грунта, карстово-суффозионные процессы и образование пустот.

Согласно исследованиям ООО «Геотехнология» [183] мерзлотно-грунтовый разрез представлен следующим образом: под слоем насыпных грунтов (толщиной 0,8-1,2 м) до глубины 2,5-3,4 м залегают преимущественно мелкие буровато-серые маловлажные и «сухие» талые пески, иногда в верхней части с маломощными (0,1-0,3 м) прослоями супесей и суглинков. Далее до глубины 6,4-7,1 м грунт, представленный светлосерыми и серыми средними песками, находится в мерзлом состоянии. Затем до кровли тоннеля трубопровода, т.е. до глубины 8,3-8,5 м залегают талые светло-серые средние кварц-полевошпатные слюдистые пески.

Изучение состояния грунтов дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги выполнены георадаром «ОКО-2» с антенными блоками АБ-250 и АБ-1200У (ООО «Логис», Россия) с октября по ноябрь 2015 г. и в марте 2016 г. Результат исследования до глубины 1,5 м представлен на рисунке 6.25б. По интерпретационным признакам, описанным в подглаве 3.2.1, на радарограмме определены следующие аномалии с градацией цвета по глубине: область малой просадки грунтов – синяя закраска, область средней просадки и разуплотнения – зеленая закраска, область глубокой просадки и выемки грунтов – желтая закраска. Аномалии носят изменчивый характер, соответственно меняется их распределение по площади и форме. В результате обработки данных по 5-ти профилям построена карта распределения аномальных областей (рисунок 6.24в). Исследованный участок по результатам интерпретации поделен на пять зон.



Условные обозначения:

- 10 30 50 70 - Шкала глубин малой просадки грунтов
- 10 30 50 70 90 - Шкала глубин средней просадки и разуплотнения грунтов
- 10 30 50 70 90 - Шкала глубин глубокой просадки и выемки грунтов
- - Предполагаемые полости
- - Георадиолокационные аномалии

Рисунок 6.24 – Результат георадиолокационных исследований автомобильной дороги: схема расположения профилей на участке исследования (а), радарограмма по профилю 3 (б) и карта распределения аномальных областей (в)

Протяженность I зоны – 210 м. На расстоянии 35-50 м расположена просадка поверхности. Согласно интерпретационным признакам на волновой картине выявлена просадка грунтов, выделенная желтым цветом на рисунке 6.25в. Причина просадки обусловлена локальным переувлажнением грунтов, вызванным инфильтрацией атмосферных осадков. Далее на 70-90 м выявлена аномалия, соответствующая малой просадки грунтов. На отрезке 150-215 м установлена аномалия, отличающаяся значительным разуплотнением грунтов и характеризующаяся средней просадкой.

В зоне II (210-500 м) на расстоянии 220-280 м зафиксированы ряд просадок, простирающиеся под поверхностью на обширной площади. Эта область на рисунке 6.24в показана синим цветом. На отрезке 330-360 м и 440-480 м выявлены аномалии. Согласно результатам интерпретации, грунты характеризуются средней просадкой, представленные зеленым цветом.

В зоне III (500-850 м) выявлены пять аномалий. Три аномалии находятся соразмерно на удалении друг от друга. Они имеют схожую конфигурацию на волновой картине, что соответствует характеру средней просадки грунтов. Четвертая аномалия на отрезке 550-575 м проинтерпретирована как область малой просадки. Пятая аномалия (785-830 м) отличается от трех вышеуказанных аномалий. На основе интерпретационных признаков и сопоставления их с данной аномалией можно предположить, что такое изменение связано с засыпкой грунтов после ремонтных работ.

В зоне IV (850-1080 м) выявлены аномалии на отметках 850-900 м и 930-970 м. Аномалии на волновой картине связаны с наличием насыпного грунта, что указывает на проведенные мероприятия по устранению провала дороги. Они распознаны как области глубокой просадки. Также выявлены участки малой (910-930 м), средней (920-950 м) и глубокой (1000-1050 м) просадки.

В зоне V (1080-1320 м) на отметках 1085-1160 м и 1180-1270 м выявлены аномалии, проинтерпретированные как области средней просадки. Аномалии связаны с наличием насыпных грунтов. На отметках 1085-1105 м и 1225-1280 м выявлены аномалии, характеризующиеся малой просадкой.

На рисунке 6.25 представлен результат исследования дороги антенным блоком АБ-250 георадара «ОКО-2». На радарограмме (рисунок 6.25а) выявлены границы раздела сред, отличающиеся своими электрофизическими свойствами. По результатам интерпретации радарограммы получен инженерно-геологический разрез до глубины 12 м (рисунок 6.25б), на котором отмечены дорожная одежда (красная сплошная линия), границы миграции поверхностных вод (синяя сплошная линия), мощность и конфигурация мерзлых зон (заливка голубым цветом), разуплотнение мерзлых (серая заливка с синими точками) и талых грунтов основания (заштрихованная область), сильнообводненные талые грунты (желтая сплошная линия). Полученный разрез на момент измерений в марте 2016 г. представлен слоем промерзания до глубины 1,5-2 м, далее грунтами в талом и пластично-мерзлом состоянии до глубины 4,4 м, выделенным мерзлым грунтом мощностью до 3,8 м, ниже глубины 8 м талыми грунтами.

Сравнение результатов разносезонных измерений в ноябре 2015 г. и марте 2016 г. показало наличие отражений, интерпретируемых как зоны переувлажненных грунтов, отмеченные синими линиями. Эти наклонные линии прослеживаются на разрезе в пределах глубин от 1,2 до 4 м. По ним осуществляется сброс поверхностных и грунтовых вод в мерзлотную толщу. На разрезе выделенный слой мерзлых грунтов имеет прерывистый характер. Места обрывов мерзлоты (серая заливка с синими точками), их конфигурация, положение по глубине и расстоянию связаны с наличием разуплотненных мерзлых грунтов в основании дороги. Нарушения сплошности, возможно, вызваны растеплением мерзлых грунтов вследствие попадания поверхностных и грунтовых вод. Положение разуплотнений в талых и пластично-мерзлых грунтах (серая заливка с черными точками) обусловлены приповерхностными аномалиями и суффозионными процессами.

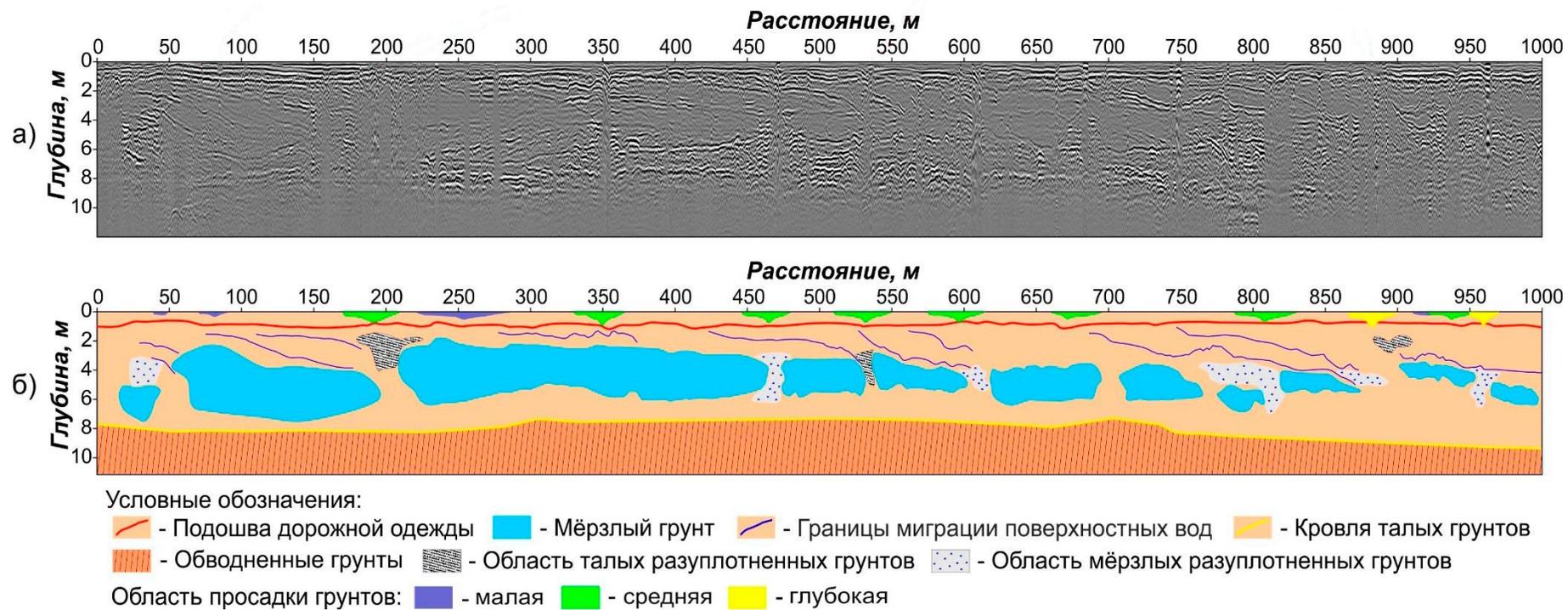


Рисунок 6.25 – Результат исследований автомобильной дороги георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250: исходная радарограмма (а) и инженерно-геологический разрез по результатам интерпретации (б)

Ниже глубин 8-10 м на разрезе выделена граница (желтая сплошная линия), которая по затуханию отраженных сигналов на радарограмме характеризует переход к более водонасыщенным грунтам по сравнению с вышележащими. Геометрия разреза, особенности строения и мощность дорожного основания, конфигурация талых и мерзлых зон обусловлены проявлением различных природно-техногенных факторов. Эти факторы приводят к растеплению грунтов и их осадке в оттаявшем состоянии под воздействием собственного веса и вибрации от автотранспорта. Инфильтрация поверхностных и сезонно-талых вод в сочетании с утечками из трубопроводов активизирует развитие суффозии грунтов, что приводит к формированию пустот и деградации физико-механических характеристик грунтов [182].

Таким образом, полученные результаты разносезонных исследований позволили оценить определенный тип мерзлотно-грунтового разреза, отражающий особенности состояния грунтового массива (мерзлые, пластично-мерзлые и талые грунты) [64], неоднородности дорожного основания (участки суффозионных процессов, наличие переувлажненных грунтов, деградация мерзлоты) [149, 150, 162].

Следующий пример георадиолокационного мониторинга криогенных процессов представлен *исследованиями параметров сезонно-талого слоя*.

Для ведения открытых горных работ наиболее благоприятен теплый период года, но его кратковременность требует весьма интенсивной организации производства. Интенсивная работа может быть организована только при наличии достаточного количества подготовленных к разработке пород. В условиях многолетнемерзлых россыпей больше половины вскрышных работ производятся с предварительным разупрочнением рыхлых пород. Например, оттайку пород можно провести с использованием различных способов в летний период предыдущего года. Однако оттаянные летом породы зимой неизбежно промерзнут снова на такую глубину, при которой их разработка станет невозможной.

Промерзание верхней части талых пород может изменяться от 1-1,5 до 3,5-4 м [94]. Это величина зависит от температуры воздуха, длительности промерзания,

высоты и плотности снега, состава и влажности пород. Одним из способов подготовки мерзлых пород к разработке является предохранение слоя от промерзания, которое существенно увеличивает продолжительность сезона горных работ. Однако, ставя соответствующую задачу, необходимо, прежде всего определить допустимую величину промерзания и не стремиться к полному предохранению. Небольшой слой мерзлых пород на поверхности талого массива может и не создавать трудностей для разработки, особенно при использовании мощной техники.

В инженерной практике определение мощности мерзлого слоя часто базируется на эмпирических данных и ретроспективном анализе ранее выполненных работ, отодвигая сложные теоретические расчеты на второй план. Однако к статистическому подходу следует относиться с осторожностью. Естественное промерзание грунтов представляет собой многофакторный, нестационарный теплофизический процесс [94], точное математическое моделирование которого сопряжено со значительными трудностями.

В условиях открытых горных работ наиболее рациональным методом подготовки полигона является естественная оттайка. Технологически она реализуется по двум схемам: с послойной выемкой (бульдозерной техникой) или через аккумуляцию талой массы (экскаваторная отработка).

Определяющим фактором эффективности здесь выступает скорость выемки оттаявшего грунта. Этот слой, а также горизонтальные прослои и линзы льда исполняют роль термоизолятора (теплового экрана), резко замедляющего оттайку вглубь массива.

Таким образом, планирование оптимального метода разупрочнения требует знания горно-геологических условий конкретного месторождения. Наиболее значимыми параметрами при этом выступают литологический состав пород, их криогенная текстура и фактическое строение массива.

Исследование динамики сезонно-талого слоя горных пород продемонстрировано на примере изучения грунтов основания водозащитной дамбы. В течение трех месяцев велись наблюдения за изменением глубины

протаивания в толще грунтов дамбы. Обследование участка начато в июне георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-250 (центральная частота 250 МГц) (рисунок 6.26). По намеченному профилю, длиной 83 м, ежемесячно выполнялись георадиолокационные исследования и бурение скважин на отметках 5 и 46 м для определения мощности сезонно-талого слоя.

Точки для бурения выбраны после рекогносцировочных работ, в местах, где хорошо прослеживались отражающие границы на радарограмме. В качестве основного поискового признака сигналов, отраженных от границ сезонно-талого слоя и мерзлых грунтов на радарограмме, принята последовательность высокоамплитудных низкочастотных сигналов, полученных на контрастной границе «талый слой - мерзлая толща». Контрастность обусловлена разницей в значениях диэлектрических проницаемостей для мерзлых горных пород (около 4) и талых (более 9) [17, 64].

В результате на радарограмме подошва сезонно-талого слоя прослеживается в виде протяженной, непрерывной оси синфазности сигналов (рисунок 6.26). Ниже СТС наблюдается еще одна граница, она менее контрастна и является геологическим основанием дамбы. По результатам наблюдений видно, что происходит увеличение глубины протаивания. Подошва СТС опускается в толщу геологического основания дамбы на отрезке 0-17 м, а на отрезке от 17 до 65 м входит в контакт с ним (рисунок 6.26в).

Таким образом, зафиксирован интересный момент, который в некоторых случаях, может привести к дренированию воды через породы геологического основания или образованию зеркала скольжения, ведущему к разрушению дамбы. В августе на отрезке 55-60 м по профилю на глубине 2,2м-3,2м зафиксированы высокоамплитудные низкочастотные сигналы, характеризующие зону переувлажнения пород. Дальнейшие исследования подтвердили развитие негативных криогенных явлений.

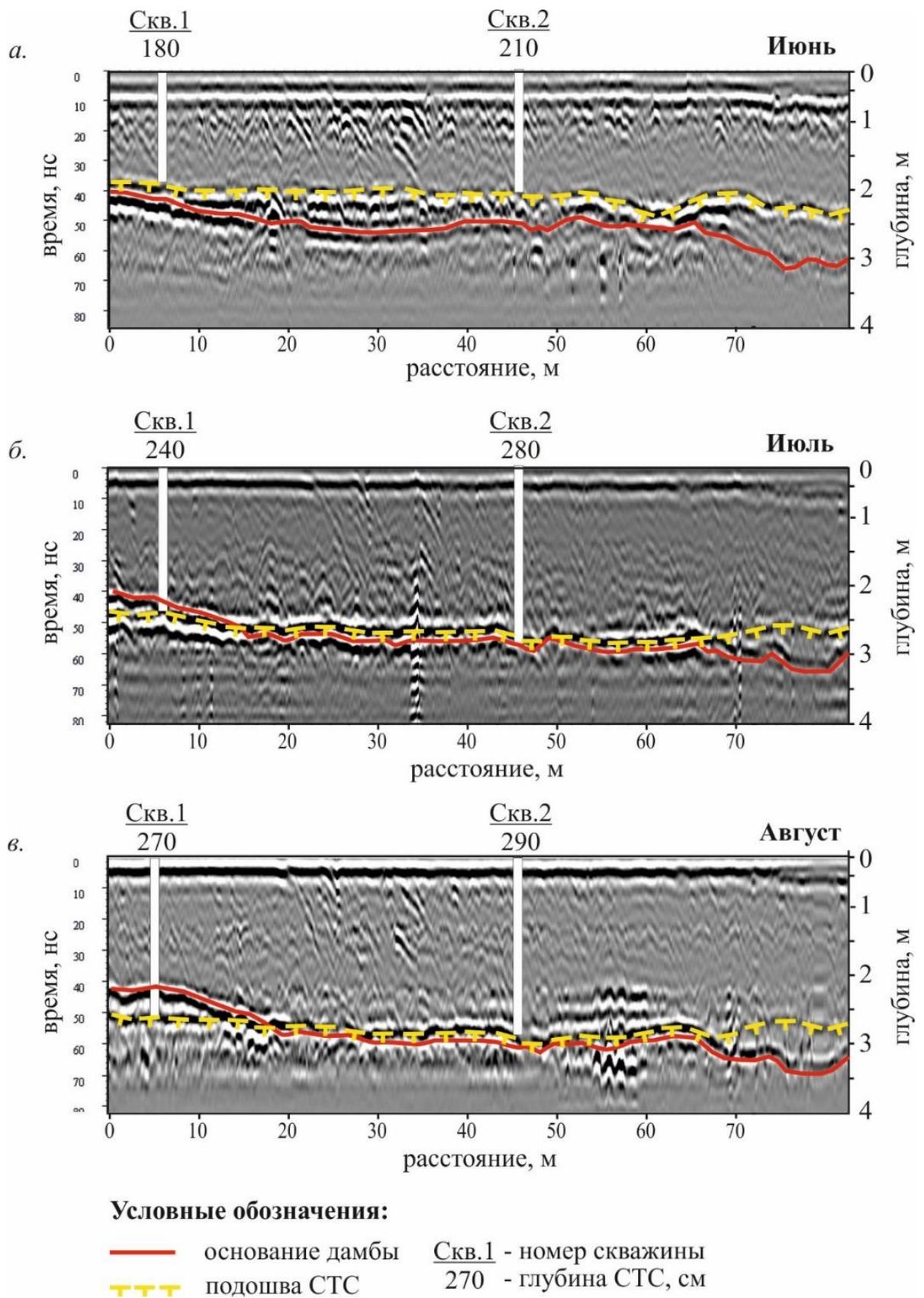


Рисунок 6.26 – Динамика мерзлотных условий грунтов оснований водозащитной дамбы по данным георадиолокации

## Выводы к главе 6

При решении инженерно-геологических задач на участках ведения горных работ на россыпных месторождениях криолитозоны, где непрерывное георадиолокационное профилирование затруднено, рекомендовано проводить измерения методиками параметрических зондирований: методика группирования сигналов с изменением положения и ориентации антенн георадаров; методика просвечивания; угловое георадиолокационное сканирование, скважинная георадиолокация.

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

Результаты физического моделирования оттайки дисперсных горных пород показали, что одним из георадиолокационных признаков для мониторинга оттайки горных пород могут выступать спектральные характеристики сигналов. Так, смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов в низкую область характеризует увеличение незамерзшей воды в породе, то есть процесс оттайки.

Экспериментальными исследованиями выявлен эффект накопления заряда на контрастных границах раздела сред при георадиолокационном зондировании, который позволяет выделять в георадиолокационном разрезе зоны повышенной и пониженной проводимости, а следовательно, проводить качественную и количественную оценку состояния исследуемой среды.

Разработана и апробирована технология выявления участков развития криогенных процессов в массивах мерзлых горных пород на основе георадиолокационных наблюдений в режиме мониторинга. Определены этапы, объем и периодичность георадиолокационных измерений, позволяющие проследить развитие опасных криогенных процессов в подповерхностных грунтах.

Для достоверного сравнительного анализа георадиолокационных параметров и точного позиционирования локальных неоднородностей с сантиметровой точностью методика мониторинга доработана в части привязки данных к местности.

Разработан программно-методический комплекс, позволяющий систематизировать, хранить (БД), отображать результаты измерений и обработки данных режимных георадиолокационных наблюдений (ГИС), а также обеспечивающий интерпретацию радарограмм на основе установленных признаков волновых полей, связанных с участками повышенной влажности, пучения пород, зон суффозии.

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании негативных криогенных процессов в грунтах оснований горнотехнических сооружений (защитные дамбы, автодороги, плотины и др.).

В комплексе методов исследований параметров сезонно-талого слоя георадиолокация является перспективным методом для мониторинговых измерений мощности этих слоев, для определения скорости и динамики развития процесса их оттаивания и промерзания в пространстве и во времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Наиболее важные результаты работы заключаются в следующем:

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

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

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

4. На основе анализа эмпирического корреляционного отношения георадиолокационных сигналов с высокоточной GPS привязкой их местоположения разработана методика георадиолокационного картирования дражных полигонов россыпных месторождений криолитозоны, отличающаяся выявлением структурных особенностей геологического строения россыпи (мощность песков, участки повышенной валунистости, гипсометрия и нарушенность плотика). Данная методика имеет важное значение для оперативного контроля полноты и качества выемки золотоносных песков, а также для принятия соответствующих технологических решений.

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

состоянии, что определяется по данным разносезонных измерений с учетом состава исследуемых пород.

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

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

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

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

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов, В. Ю. Некоторые особенности геолого-геофизических моделей россыпных месторождений алмазов / В. Ю. Абрамов, В. И. Бровкин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2012. — № 4. — С. 24–29.
2. Автомобильные дороги : георадары в дорожном строительстве : тематическая подборка. — Москва : Транспорт, 2003. — 120 с.
3. Александров, П. Н. Теоретические основы георадарного метода : монография / П. Н. Александров. — Москва : Физматлит, 2017. — 112 с.
4. Амангусов, Н. Ж. Эксплуатационная разведка кратерной части месторождения им. В. Гриба / Н. Ж. Амангусов, Е. М. Веричев, А. В. Подлевских // Горный журнал. — 2014. — № 3. — С. 27–32.
5. Анчисон, Т. К. Основы взрывного дробления / Т. К. Анчисон // Открытые горные работы / под редакцией Ю. П. Порлейдера. — Москва : Недра, 1971. — С. 128–145.
6. Банков, С. Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва, 2008. — 276 с.
7. Боголюбов, А. Н. Электропрофилирование на постоянном токе по методу двух составляющих / А. Н. Боголюбов // Методика геофизических исследований при инженерно-геологических изысканиях : труды ПНИИИС. — Москва, 1972. — Т. 15. — С. 3–55.
8. Богородский, В. В. Импульсное зондирование многолетней мерзлоты / В. В. Богородский, Г. В. Трепов, А. Н. Шереметьев // Журнал технической физики. — 1975. — Т. 15, № 7. — С. 1377–1382.
9. Богородский, В. В. Электрические характеристики систем горная порода — лед / В. В. Богородский // Доклады Академии наук СССР. — 1970. — Т. 190, вып. 1. — С. 88–90.
10. Бричева, С. С. Георадар в геоэкологических исследованиях при искусственном обводнении торфяников / С. С. Бричева, В. М. Матасов, П.

- М. Шилов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2017. — № 3. — С. 76–83.
11. Бричева, С. С. Опыт использования георадарных исследований на позднепалеолитической стоянке Авдеево в Курской области / С. С. Бричева, М. Н. Кандинов, В. М. Матасов // Вестник Московского университета. Серия 23: Антропология. — 2016. — № 4. — С. 132–143.
12. Бричева, С. С. Признаки наличия жильного льда в разрезе по данным георадиолокации / С. С. Бричева, В. П. Мельчинов // Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе : сборник тезисов научно-практической конференции (г. Москва, 16–22 октября 2020 г.) / Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН. — Москва : Академия Естествознания, 2020. — С. 90–94.
13. Брякин, И. В. Системы подповерхностного зондирования для малоглубинной геофизики / И. В. Брякин // Проблемы автоматизации и управления. — 2015. — № 1 (28). — С. 83–93.
14. Васильева, Н. В. Автоматизация анализа данных георадиолокационных исследований ледяного покрова реки Лена / Н. В. Васильева, Д. А. Павлов, Е. А. Петрова, М. П. Фёдоров // Современные наукоёмкие технологии. — 2022. — № 8. — С. 32–37.
15. Вахромеев, Г. С. Моделирование в разведочной геофизике / Г. С. Вахромеев, А. Ю. Давыденко. — Москва : Недра, 1987. — 192 с.
16. Великин, С. А. Строение верхней части земной коры Норильского района по результатам магнитотеллурических зондирований / С. А. Великин, Ю. Л. Марченко, К. И. Бажин // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. — 2015. — № 3 (27). — С. 35–46.
17. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию : учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. — Москва : Издательство МГУ, 2004. — 153 с.

18. Владов, М. Л. Георадиолокационные исследования на пресноводных акваториях / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов, А. Ю. Калашников // Инженерная геология. — 2007. — № 3. — С. 47–51.
19. Владов, М. Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений : учебное пособие / М. Л. Владов, М. С. Судакова ; рецензенты : Е. А. Вознесенский, В. П. Золотарев. — Москва : ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2017. — 240 с.
20. Владов, М. Л. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. — Москва : GDS Production, 1998. — 81 с.
21. Воронков, О. К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов) / О. К. Воронков. — Санкт-Петербург : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2008. — 300 с.
22. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / И. Н. Вотяков. — Новосибирск : Наука, 1975. — 174 с.
23. Геокриологические опасности : тематический том / под редакцией Л. С. Гарагули, Э. Д. Ершова. — Москва : КРУК, 2000. — 316 с.
24. Геокриология СССР : Средняя Сибирь / редакционная коллегия : Э. Д. Ершов [и др. - 30 фамилий] ; ответственные редакторы К. Л. Кондратьева, К. И. Сычев, С. М. Фотиев. — М. : Недра, 1989. — 414 с.
25. Геофизические методы изучения мерзлых толщ в СССР : обзор / составители: А. Т. Акимов, В. П. Мельников, А. Д. Фролов. — Москва : ВИЭМС, 1979. — 30 с. — (Региональная разведка и промысловая геофизика).
26. Гирич, И. Б. Повышение эффективности взрывных работ на карьерах со сложной геологической структурой / И. Б. Гирич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2013. — № 5. — С. 306–308.
27. Горбатенко, О. Н. Использование радиопоглощающих радиорассеивающих материалов для защиты георадара от

- электромагнитных помех / О. Н. Горбатенко, С. Б. Бибииков // Специальная техника. — 2006. — № 3. — С. 26.
28. ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 19 с.
29. Готовцев, С. П. О геокриологической изученности южной части Западной Якутии / С. П. Готовцев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : материалы X Всероссийской научно-практической конференции (г. Якутск, 08–10 апреля 2020 г.). — Якутск : Издательский дом СВФУ, 2020. — С. 472–476.
30. Далатказин, Т. Ш. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива / Т. Ш. Далатказин, А. С. Ведерников, Д. В. Григорьев [и др.] // Горная промышленность. — 2022. — № 1S. — С. 105–110.
31. Данилов, И. Д. Подземные льды / И. Д. Данилов. — Москва : Недра, 1990. — 140 с.
32. Данилов, Ю. Г. Добыча алмазов в Арктических районах Республики Саха (Якутия) / Ю. Г. Данилов, С. П. Леонтьев // Концепт : [научно-методический электронный журнал]. — 2016. — № 11. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dobycha-almazov-v-arkticheskikh-rayonah-respubliki-saha-yakutiya/viewer> (дата обращения: 17.03.2025).¶
33. Демьянов, В. В. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Соловьева. — Москва : Наука, 2010. — 327 с.
34. Денисов, Р. Р. ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ: профессиональное решение для метода георадиолокации / Р. Р. Денисов // Георадар-Эксперт : [сайт]. — 2025. — URL: <https://www.georadar-expert.ru/> (дата обращения: 17.03.2025).
35. Денисов, Р. Р. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме / Р. Р. Денисов, В. В. Капустин // Геофизика. — 2010. — № 4. — С. 76–80.
36. Джураев, Р. У. Анализ бурения скважин с продувкой воздухом / Р. У. Джураев, М. В. Меркулов // Горный журнал. — 2014. — № 5 (2). — С. 327–330.

37. Дьяков, А. Ю. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов : монография / А. Ю. Дьяков, А. И. Калашник. — Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2021. — 110 с.
38. Дэвис, Дж. С. Статистический анализ данных в геологии : в 2 книгах. Книга 1 / Дж. С. Дэвис ; перевод с английского В. А. Голубевой ; под редакцией Д. А. Родионова. — Москва : Недра, 1990. — 319 с.
39. Дягилева, Р. А. Особенности георадиолокационных волновых полей при исследовании подземных льдов криолитозоны / Р. А. Дягилева, К. О. Соколов // Инженерная и рудная геофизика 2020 : 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020». — 2020. — С. 114.
40. Дягилева, Р. А. Разработка критериев выявления подземного льда на основе компьютерного моделирования георадиолокации массива мерзлых горных пород для инженерно-геологического обеспечения буровзрывных работ / Р. А. Дягилева, К. О. Соколов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6, № 2. — С. 73–77.
41. Едемский, Д. Е. Георадарное обследование полигонально-жильных структур в Арктике / Д. Е. Едемский, В. Е. Тумской, И. В. Прокопович // Мониторинг в криолитозоне : сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов (г. Москва, 14–17 июня 2022 г.) / под редакцией Р. Г. Мотенко. — Москва : КДУ : Добросвет, 2022. — С. 381–388.
42. Ермаков, С. А. Открытая разработка россыпных месторождений в условиях криолитозоны : учебное пособие / С. А. Ермаков, А. М. Бураков, Б. Н. Заровняев. — Москва : Вузовская книга, 2008. — 216 с.
43. Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений Севера / С. А. Ермаков, А. М. Бураков, И. И. Заудальский, С. В. Панишев ; ответственный редактор В. А. Шерстов ; рецензенты Б. Н. Заровняев, Л. Л. Фёдорова, А. С. Курилко. — Якутск : ЯФ ГУ «Издательство СО РАН», 2004. — 364 с.¶

44. Железняк, М. Н. Геолого-геокриологические условия Верхне-Мунского алмазного рудного поля на этапе завершения разведки / М. Н. Железняк, М. М. Шац. // Недропользование XXI век. — 2019. — № 4 (80). — С. 46–55. — URL: [https://nedra21.ru/upload/iblock/001/1eqi1hs4xanszyq3b4ruau1inuvly0ju/46\\_55.pdf](https://nedra21.ru/upload/iblock/001/1eqi1hs4xanszyq3b4ruau1inuvly0ju/46_55.pdf) (дата обращения: 18.01.2026).
45. Железняк, М. Н. Мерзлотные и эколого-технологические условия золоторудного месторождения «Таборное» (Южная Якутия) / М. Н. Железняк // Geoinfo.ru : независимый электронный журнал. — 2020. — 27 января. — URL: <https://geoinfo.ru/product/zheleznyak-mihail-nikolevich/merzlotnye-i-ehkologo-tehnologicheskie-usloviya-zolotorudnogo-mestorozhdeniya-tabornoe-yuzhnaya-yakutiya-42090.shtml> (дата обращения: 18.01.2026).
46. Железняк, М. Н. Эколого-геокриологические условия месторождения Томтор (Северо-Западная Якутия) / М. Н. Железняк // Geoinfo.ru : независимый электронный журнал. — 2019. — 18 марта. — URL: <https://geoinfo.ru/product/zheleznyak-mihail-nikolevich/ehkologo-geokriologicheskie-usloviya-mestorozhdeniya-tomtor-severo-zapadnaya-yakutiya-40274.shtml> (дата обращения: 18.01.2026).
47. Жуков, А. А. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения солей / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарева, Р. И. Царев // Инженерные изыскания. — 2017. — № 3. — С. 28–33.
48. Закревский, К. Е. Геологическое 3D моделирование / К. Е. Закревский. — Москва: Маска, 2009. — 376 с.
49. Закревский, К. Е. Оценка качества 3D моделей / К. Е. Закревский, Д. М. Майсюк, В. Р. Сыртланов. — Москва : Маска, 2008. — 272 с.
50. Иванов, А. В. Георадарное исследование структуры блока для буровзрывных работ на разрезе «Заречный» / А. В. Иванов, С. В. Петров // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 35–39.

51. Иванов, С. А. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для двухмерных задач электродинамики / С. А. Иванов, Б. В. Сестрорецкий // Журнал радиоэлектроники. — 2007. — № 5.
52. Иноземцев, М. А. Использование программного обеспечения grgMax для моделирования работы георадара / М. А. Иноземцев // Шарыгинские чтения : Материалы Всероссийской научной конференции (г. Томск, 1-2 октября 2020 г.). — Томск : ТУСУР, 2020. — С. 186–193.
53. Исследование и разработка эффективных конструктивных и технологических параметров подземной и открытой геотехнологии, методов освоения недр криолитозоны : отчет о НИР (заключительный) / Институт горного дела Севера им. Н.-В. Черского ; руководитель С. М. Ткач ; исполнители : Л. Л. Федорова, В. П. Зубков, Н. С. Батугина [и др. - 33 фамилии]. — Якутск, 2020. — 94 с. — № проекта 0297-2019-0041 (фондодержатель НТБ ИГДС СО РАН).¶
54. Каверзный, ручей (правый приток реки Аллах-Юнь) : паспорт объекта недропользования // Недра ДВ : [портал]. [Золото россыпное, Республика Саха (Якутия), Усть-Майский район]. — URL: [http://nedradv.ru/nedradv/ru/find\\_place?obj=1c7620bd8e4dcc34aaf1490c64beafd1](http://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=1c7620bd8e4dcc34aaf1490c64beafd1) (дата обращения: 18.01.2026).
55. 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). — С. 48-53.
56. Капутин, Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика / Ю. Е. Капутин. — Санкт-Петербург : «Недра», 2002. — 424 с.
57. Киприянов, Г. О. Исследование влияния геокриологических факторов на процесс взрывного разрушения многолетнемерзлых осадочных пород / Г. О. Киприянов, В. С. Сорокин // Повышение эффективности открытой угледобычи : Сборник научных трудов. — Кемерово, 1989. — С. 137–144.

58. Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых / Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ГКЗ России). — Москва : ГКЗ России, 1997. — 16 с.
59. Крылов, О. В. Геолого-геофизические исследования прибрежной зоны юго-западной части Крымского полуострова / О. В. Крылов, Н. В. Лубнина, М. Л. Владов [и др.] // Морские исследования и образование (MARESEDU-2020) : Труды IX Международной научно-практической конференции (г. Тверь, 2020 г.). — Тверь : Политех-Пресс, 2020. — С. 145–147.
60. Кулижников, А. М. Опыт применения георадарных технологий в дорожном хозяйстве : обзорная информация / А. М. Кулижников, Н. А. Лушников, А. А. Белозеров. — Москва : Информационный центр по автомобильным дорогам, 2004. — Вып. 2. — (Автомобильные дороги и мосты).
61. Куляндин, Г. А. 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, 05–07 апреля 2017 г.). — Якутск : Издательский дом СВФУ, 2017. — С. 451–454.
62. 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.
63. 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.
64. Куляндин, Г. А. Геофизический мониторинг криогенного состояния горных пород бортов и откосов горнотехнических сооружений на

территории Якутии / Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова, М. П. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № 7-1. — С. 105–115.

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

66. Куляндин, Г. А. 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 / Куляндин Гаврил Александрович ; Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Якутск, 2022. — 135 с. : ил.

67. Куляндин, Г. А. Расчленение горизонтально-слоистых сред георадиолокацией при изменении углов зондирования / Г. А. Куляндин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции (г. Якутск, 10–12 апреля 2019 г.) : в 2 томах. Том 2. — Якутск : Издательский дом СВФУ, 2019. — С. 253–256.

68. 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 : Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой памяти чл.-кор. РАН Новопашина М. Д. (г. Якутск, 16–19 июня 2015 г.). — Якутск : Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2015. — С. 148–150.

69. Лещанский, Ю. И. Радиофизические свойства сред: песчаного и глинистого грунтов, строительных материалов : коллективная монография /

- Ю. И. Лещанский, А. И. Дробышев, Д. П. Посевин ; под редакцией А. Ю. Гринева. — Москва : Радиотехника, 2005. — 416 с.
70. Лунев, Б. С. Атлас геологии россыпей. Том 1.: Факторы россыпеобразования / Б. С. Лунев, О. Б. Наумова ; Пермский государственный университет. — Пермь: Типография Пермского университета, 2005. — 343 с.
71. Манштейн, А. К. Малоглубинная геофизика : пособие по спецкурсу / А. К. Манштейн. — Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 2002. — 135 с.
72. Мельников, В. П. Электрофизические исследования мерзлых пород (методология и практика) / В. П. Мельников ; ответственный редактор Б. И. Геннадиник. — Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1977. — 108 с.
73. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Россыпные месторождения / Министерство природных ресурсов РФ. — Москва : ГКЗ, 2000. — 65 с. — URL: <https://www.geokniga.org/books/2490> (дата обращения: 22.09.2022).
74. Минорин, В. Е. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Книга 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.
75. Набатов, В. В. Оценка состояния заобделочного пространства тоннелей метрополитенов по спектральным атрибутам добротности колебаний системы «обделка – грунт» / В. В. Набатов // Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 67–70.
76. Наука и техника : коллективная монография / Т. Н. Балк, М. А. Бауэр, В. И. Бирюлин, Л. Л. Федорова [и др.] ; ответственный редактор Я. А. Максимов. — Красноярск : Научно-инновационный центр, 2011. — 182 с.
77. Нерадовский, Л. Г. Методические возможности георадиолокации мониторинга состояния мерзлых грунтов / Л. Г. Нерадовский, А. В.

Омельяненко, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 7. — С. 44–47.

78. Нерадовский, Л. Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации / Л. Г. Нерадовский. — Москва : РАН, 2009. — 337 с.

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

80. Нерадовский, Л. Г. Опыт изучения природы периодичности сигналов георадиолокации методами спектрального анализа / Л. Г. Нерадовский, Л. Л. Федорова // Успехи современного естествознания. — 2020. — № 6. — С. 95–106. — DOI: 10.17513/use.3741.

81. Нерадовский, Л. Г. Опыт применения георадиолокации на Северо-Востоке Якутии / Л. Г. Нерадовский // Инженерные изыскания. — 2013. — № 2. — С. 26–37.

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

83. 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.

84. Омельяненко, А. В. Георадиолокационная технология дистанционного мониторинга состояния ледяного покрова северных рек с борта летательного аппарата / А. В. Омельяненко, Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров // Защита населения и объектов от водной стихии северных рек : Сборник докладов Общероссийской научно-практической конференции. — Якутск, 2013. — С. 106–109.

85. Омельяненко, А. В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород : монография / А. В. Омельяненко, Л. Л.

Федорова ; Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского. — Якутск : Издательство ЯНЦ СО РАН, 2006. — 136 с.

86. Основы геокриологии (мерзловедения). В двух частях. - Часть 1 : Общая геокриология / ответственные редакторы П. Ф. Швецов, Б. Н. Достовалов. — Москва : Издательство АН СССР, 1959. — 460 с.

87. Патент № 141971 Российская Федерация, МПК G01S 13/88 (2006.01). Антенный блок георадара : № 2014102836/07 : заявл. 28.01.2014 : опубл. 26.06.2014 / Куляндин Г. А., Омеляненко П. А. ; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Бюл. № 17. — 1 с. : ил.

88. Патент № 2490671 Российская Федерация, МПК G01V 3/12, G01S 13/88. Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород : № 2011125238/28 : заявл. 17.06.2011 : опубл. 20.08.2013 / Нерадовский Л. Г. ; заявитель и патентообладатель Институт мерзловедения им. П. И. Мельникова СО РАН, Бюл. № 23. — 11 с.

89. Патент № 2548920 Российская Федерация, МПК G01S 13/95. Способ прогнозирования гидрологической обстановки на затороопасных участках рек : № 2013146507/28 : заявл. 18.10.2013 : опубл. 20.04.2015 / Находкин Н. А., Быков А. Н., Омеляненко А. В., Федорова Л. Л., Федоров М. П., Христофоров И. И., Кайгородов К. И., Омеляненко П. А. ; заявитель и патентообладатель Академия наук Республики Саха (Якутия). — 6 с.

90. Патент № 2561769 Российская Федерация, МПК G01V 3/12 (2006.01). Способ георадиолокации в условиях ограниченного пространства : № 2014117846/28 : заявл. 29.04.2014 : опубл. 10.09.2015 / Куляндин Г. А., Омеляненко П. А. ; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН. — Бюл. № 25. — 4 с. : ил.

91. 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 / АО «Иргиредмет» ; руководитель В. Е. Дементьев ; исполнители: В. С. Гурулев [и др.]. — Иркутск, 2011. — С. 12–43.

92. Петровский, А. А. Волномерный метод в применении к изучению верхнего слоя почвы / А. А. Петровский, Б. Н. Достовалов // Труды Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева. — 1947. — Т. 5. — С. 49–52.

93. Петровский, А. А. Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами / А. А. Петровский, Б. Н. Достовалов // Труды Института мерзлотоведения АН СССР. — 1947. — Т. 5. — С. 121–160.

94. Потемкин, С. В. Оттайка мерзлых пород : учебное пособие для вузов по спец. «Открытые горные работы» / С. В. Потемкин. — Москва : «Недра», 1991. — 160 с.

95. Программное обеспечение обработки георадиолокационных данных : отчет о НИР / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Д. В. Саввин ; организация-разработчик Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Москва : ВНИИЦ, 2012. — № 50201350032.

96. Программный комплекс GeoReader : руководство пользователя. — Учалы : ТИМ, 2025. — URL: <https://geotim.ru/produkty-i-uslugi/programmnyj-kompleks-georeader/> (дата обращения: 17.03.2025).

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

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

99. Прудецкий, Н. Д. Методика георадиолокационного картирования незатронутых термокарстом повторно-жильных льдов россыпных

месторождений криолитозоны : специальность 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Прудецкий Николай Дмитриевич ; Якутский научный центр СО РАН, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН. — Якутск, 2024. — 19 с.

100. Прудецкий, Н. Д. Методика георадиолокационного картирования незатронутых термокарстом повторно-жильных льдов россыпных месторождений криолитозоны : специальность 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Прудецкий Николай Дмитриевич ; Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Якутск, 2024. — 131 с. : ил.

101. Прудецкий, Н. Д. Результаты георадиолокационных исследований верхней части коренных пород криолитозоны / Н. Д. Прудецкий // Проблемы горных наук: взгляд молодых ученых : Материалы Республиканской научной конференции молодых ученых и специалистов, посвящённой памяти академика РАН Николая Васильевича Черского (г. Якутск, 24–26 марта 2014 г.). — Якутск : Ахсаан, 2014. — С. 80–82.

102. Прудецкий, Н. Д. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной, заполненной льдом / Н. Д. Прудецкий, К. О. Соколов, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 11. — С. 107–113.

103. Пути повышения эффективности и экологической безопасности открытой добычи твердых полезных ископаемых : коллективная монография / В. И. Ческидов [и др. - 33 фамилии] ; ответственный редактор В. Н. Опарин ; Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Институт горного дела, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского, Институт угля и углехимии, Институт водных и экологических проблем, Институт

мониторинга климатических и экологических систем, Институт почвоведения и агрохимии, Уральское отделение, Институт горного дела, Дальневосточное отделение. — Новосибирск : Издательство СО РАН, 2010. — 254 с.

104. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3» : инструкция по эксплуатации (техническое описание). — 2018. — URL: <http://www.logsys.ru> (дата обращения: 18.01.2026).

105. Россыпи алмазов России / С. А. Граханов, В. И. Шаталов, В. А. Штыров [и др.] ; главный редактор Д. А. Додин. — Новосибирск : Гео, 2007. — 457 с. — ISBN 978-5-9747-0079-8

106. Руководство пользователя программой GeoScan32 : программа управления Георадаром «ОКО-2» и визуализации получаемых данных. — 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).

107. Саввин, Д. В. 3D картирование гипсометрии плотика дражных полигонов на примере месторождения р. Аллах-Юнь методом георадиолокации / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, А. С. Стручков, Г. А. Куляндин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — Спец. вып. 21. — С. 504–513.

108. Саввин, Д. В. Динамическая фильтрация георадиолокационных данных мерзлого горного массива неоднородной структуры / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 6. — С. 143–147.

109. Саввин, Д. В. Обнаружение криогенных явлений в грунтах оснований инженерных сооружений методом георадиолокации / Д. В. Саввин, Г. А. Куляндин, Л. Л. Федорова // Естественные и технические науки. — 2018. — № 11. — С. 171–173.

110. Саввин, Д. В. Опыт георадиолокационных исследований в инженерно-геологических изысканиях / Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова // Материалы XI

Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения (г. Магадан, 05–08 сентября 2017 г.). — Магадан, 2017. — С. 304–305.

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

112. 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 (научно-технический журнал). — 2011. — № 8. — С. 300–305.

113. Саввин, Д. В. Совершенствование методики георадиолокационных исследований особенностей строения горного массива россыпных месторождений криолитозоны : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Саввин Денис Валерьевич ; Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Якутск, 2013. — 136 с. : ил.

114. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620713 Российская Федерация. Данные мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги : № 2016620386 : заявл. 05.04.2016 : опубл. 01.06.2016 / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Д. В. Саввин, А. С. Стручков ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук. — Бюл. № 6.

115. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621825 Российская Федерация. Данные разносезонных мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги Вилюйского тракта (г. Якутск, Республика Саха (Якутия)) в период 2012 по

2024. - № 2025621825 : заявл. 09.04.2025 : опубл. 23.04.2025 / Федорова Л. Л., Шамаев С. Д., Свинобоев А. С. ; правообладатель Якутский научный центр СО РАН. — Бюл. № 5.

116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661403 Российская Федерация. Определение наличия подземного пластового льда по данным георадиолокации : № 2020660078 : заявл. 07.09.2020 : опубл. 22.09.2020 / К. О. Соколов ; правообладатель Якутский научный центр СО РАН. — Бюл. № 12. — 1 с.

117. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614604 Российская Федерация. Модель зондирования четырехслойной среды георадиолокаторами серии «ОКО». — № 014662985 : заявл. 15.12.14 : опубл. 20.05.15 : зарегистрировано 21.04.2015 / Федорова Л. Л., Федоров В. Н., Константинов В. В. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Бюл. № 5.

118. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615298 Российская Федерация. Автоматический поиск структурных особенностей горного массива на основе преобразования Гильберта данных георадиолокации. — 2016612486 : заявл. 22.03.2016 : опубл. 19.05.2016 / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Бюл. № 6.

119. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662819 Российская Федерация. Двухмерная лучевая модель зондирования неоднородной среды георадиолокаторами серии «ОКО» : № 2017615315 : заявл. 05.06.2017 : опубл. 17.11.2017 / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова, В. В. Константинов ; правообладатель Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН. — Бюл. № 11.

120. Седов, Б. М. Сейсмические исследования в районах вечной мерзлоты ; ответственный редактор Л.В. Рыкунов / Северо-Восточный комплексный НИИ ДВНЦ АН ССР. — Москва : Наука, 1988. — 180 с.
121. Секисов, Г. В. Горно-геологические типы глубокозалегающих россыпей Восточно-Российского региона и перспективы их освоения / Г. В. Секисов, Ю. А. Мамаев, В. С. Литванцев, А. П. Ван-Ван-Е, В. И. Гуревич, А. В. Аблезов // Горный информационно-аналитический бюллетень. (информационно-аналитический бюллетень). — 2005. — № 1. — С. 159–164.
122. Скрыбыкин, Н. Н. Техника бурения взрывных скважин в мерзлых породах / Н. Н. Скрыбыкин. — Москва : Недра, 1989. — 172 с.
123. Соколов, К. О. Алгоритм обработки данных георадиолокации для выявления контуров деформационных геологических структур / К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 10. — С. 138–145.
124. 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 Уральского государственного горного университета. — 2021. — № 4 (64). — С. 88–94.
125. Соколов, К. О. Алгоритм обработки и интерпретации георадиолокационных данных при изучении геокриологических структур многолетнемерзлых пород / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, А. А. Федоров // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 3 (59). — С. 75–80.
126. Соколов, К. О. Выявление границ продуктивного слоя алмазоносной россыпи частотно-временным анализом данных георадиолокации мерзлого горного массива / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2009. — № 7. — С. 147–152.

127. Соколов, К. О. Индикационные признаки трещин рыхлых отложений для оценки геокриологических условий месторождений криолитозоны методом георадиолокации / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, Н. Д. Прудецкий // Естественные и технические науки. — 2018. — № 11 (125). — С. 174–177.
128. Соколов, К. О. Картирование палеорусел на участках россыпных месторождений криолитозоны методом георадиолокации / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий, Л. Л. Федорова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — Спец. вып. 21 : Проблемы комплексного освоения георесурсов. — С. 514–521.
129. Соколов, К. О. Обоснование структуры и функциональности алгоритмического обеспечения георадиолокационного мониторинга влажности горных пород криолитозоны / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин, А. С. Стручков // Фундаментальные исследования. — 2017. — № 9-1. — С. 93–98.
130. Соколов, К. О. Опыт применения георадиолокации для исследования разрывных нарушений на россыпных месторождениях криолитозоны / К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 7. — Спец. вып. 30 : Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. — С. 333–337.
131. Соколов, К. О. Оценка строения массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, перекрытого электропроводящим слоем, методом георадиолокации : специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Соколов Кирилл Олегович ; Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. — Якутск, 2010. — 146 с. : ил.
132. Соколов, К. О. Практическое применение георадиолокации для исследования россыпных месторождений алмазов / К. О. Соколов // Современные проблемы геонаук. — 2016. — № 1. — С. 45–52.

133. Соловьев, Е. Э. Исследование геокриологических условий массива многолетнемерзлых пород неразрушающими электромагнитными методами / Е. Э. Соловьев, Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова // Горный журнал. — 2019. — № 2. — С. 31–37.
134. Сорокин, В. С. Исследование влияния некоторых факторов на эффективность взрывного разрушения многолетнемерзлых осадочных горных пород / В. С. Сорокин, Г. О. Киприянов, Г. В. Шубин // Горнодобывающая Якутия на рубеже 3-го тысячелетия : сборник научных трудов. — Нерюнгри : Издательство Якутского государственного университета, 2000. — С. 51–56.
135. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных : учебное пособие / А. В. Старовойтов. — Москва : Издательство МГУ, 2008. — 192 с.
136. Степанов, Ю. И. Георадарные исследования подземных наледей в пещерах Урала / Ю. И. Степанов, А. А. Тайницкий, А. А. Кичигин // Комплексное использование и охрана подземных пространств : Сборник докладов Международной научно-практической конференции (г. Кунгур, 2014 г.) / под общей редакцией О. Кадебской, В. Андрейчука. — Екатеринбург : Горный институт УрО РАН, 2014. — С. 65–68.
137. Степанов, Ю. И. Изучение многолетнего льда при помощи георадара и минералогических исследований на примере пещеры Медео (Северный Урал) / Ю. И. Степанов, А. А. Тайницкий, А. В. Кичигин, О. И. Кадебская // Проблемы региональной экологии. — 2014. — № 1. — С. 30–35.
138. Стручков А. С. Способ автоматического выделения границ раздела слоев на георадиолокационном разрезе массива многолетнемерзлых горных пород // ЭРЭЛ-2016 : Сборник материалов Всероссийской конференции научной молодежи (г. Якутск, 21-25 ноября 2016 г.). — Якутск : Издательский дом СВФУ, 2016. — С. 68—72.
139. Судакова, М. С. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге / М. С. Судакова, А. В. Брушков, С. А. Великин, М. Л. Владов,

Ю. Д. Зыков, В. В. Неклюдов, В. В. Оленченко, П. Ю. Пушкарев, М. Р. Садуртдинов, А. Г. Скворцов, А. М. Царев // Вестник Московского университета. Серия 4 : Геология. — 2022. — № 6. — С. 141–151.

140. «ОКО-2». Поисковый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации [на георадар]. — URL: [https://geodevice.uz/upload/iblock/2d4/ОКО2-Search\\_kit\\_manual-ru.pdf](https://geodevice.uz/upload/iblock/2d4/ОКО2-Search_kit_manual-ru.pdf) (дата обращения: 22.09.2022).

141. Титов, А. Н. Возможности создания сверхширокополосного поглотителя радиоизлучения / А. Н. Титов, С. Б. Бибииков, А. К. Черепанов, Н. Н. Евтихеев, О. Н. Смольникова // Методы и устройства передачи и обработки информации. — 2009. — № 11. — С. 224–231.

142. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика : учебник / О. И. Фальковский. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2009. — 432 с.

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

144. Федоров, В. Н. Использование дифференциальных ABCD-матриц квази-Т-волн для моделирования распространения импульсных сигналов в слоистых средах с потерями / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова, Н. Д. Малютин // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2017) : Материалы 27-й Международной Крымской конференции (г. Севастополь, 10–16 сентября 2017 г.). — Севастополь, 2017. — Т. 3. — С. 1593–1599.

145. Федоров, В. Н. Электродинамическое моделирование неоднородных сред методом дифференциальных ABCD матриц / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова, Н. Д. Малютин // Материалы VIII Международной конференции по математическому моделированию (г. Якутск, 04–08 июля 2017 г.). — Якутск, 2017. — С. 162.

146. Федоров, В. Н. Электродинамическое моделирование россыпных месторождений при георадиолокации / В. Н. Федоров, Л. Л. Федорова //

Радиолокация и радиосвязь : Сборник трудов X Всероссийской конференции (г. Москва, 21–23 ноября 2016 г.). — Москва : ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2016. — С. 85–89.

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

148. Фёдоров, М. П. Оценка пространственной неоднородности ледяного покрова р. Лена методом георадиолокации / М. П. Фёдоров, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Известия Уральского государственного горного университета. — 2019. — Вып. 4 (56). — С. 7–20.

149. Федорова, Л. Л. Возможности диагностики криогенных процессов в грунтах оснований автодорог методом георадиолокации / Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин, М. П. Фёдоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2017. — № 7. — С. 195–202.

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

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

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

153. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования геокриологических объектов массива горных пород месторождений

- криолитозоны / Л. Л. Федорова, Е. Э. Соловьев, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин // Горный журнал. — 2019. — № 2. — С. 38–42.
154. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования горно-геологических условий дражных полигонов / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин // Горный журнал. — 2015. — № 4. — С. 10–14.
155. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные исследования оттайки мерзлых горных пород в лабораторных условиях / Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров, Г. А. Куляндин, Д. В. Саввин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 5. — С. 99–111.
156. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные модели массива горных пород Субарктической зоны Якутии / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов, Н. Д. Прудецкий, С. Д. Шамаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. — № 12-2. — С. 129–140.
157. Федорова, Л. Л. Георадиолокационные модели массива горных пород россыпных месторождений золота умеренной климатической зоны Якутии / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, С. Д. Шамаев // Горная промышленность. — 2025. — № 4S. — С. 87–93.
158. Федорова, Л. Л. Георадиолокация массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны, перекрытого электропроводящим слоем / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2011. — № 8. — С. 310–316.
159. 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.
160. Федорова, Л. Л. Изучение строения ледяного покрова на затороопасных участках северных рек методом георадиолокации / Л. Л. Федорова, М. П. Фёдоров // Георадар-2023 : сборник тезисов научно-практической конференции (г. Москва, 22–24 марта 2023 г.). — Москва : Издательский дом Академии Естествознания, 2023. — С. 35–39.

161. Федорова, Л. Л. Исследование особенности строения техногенных отвалов методом георадиолокации / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, С. И. Поисеева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2021. — № 12-1. — С. 243–254.
162. 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.
163. Федорова, Л. Л. Картирование структурных неоднородностей мерзлого горного массива методом георадиолокации / Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин, В. Н. Федоров // Горная промышленность. — 2015. — № 5 (123). — С. 99–101.
164. Федорова, Л. Л. Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Наука и образование. — 2017. — № 4. — С. 72–76.
165. Федорова, Л. Л. О возможности применения георадиолокации при подготовке и отработке дражных полигонов / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2010. — № 9. — С. 380–383.
166. Федорова, Л. Л. Определение участков талых пород в многолетнемерзлом массиве по данным георадиолокации / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, Н. Д. Прудецкий // Успехи современного естествознания. — 2023. — № 11. — С. 192–198.
167. Федорова, Л. Л. Определение электрофизических свойств пород горного массива методом георадиолокационного каротажа / Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко, Г. А. Куляндин, В. В. Оленченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2011. — № 8. — С. 300–304.

168. Федорова, Л. Л. Опыт применения георадиолокационных технологий при разработке алмазоносных месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Записки Горного института. — 2013. — Т. 200. — С. 99–103.
169. Федорова, Л. Л. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии / Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 11-1. — С. 160–165.
170. Федорова, Л. Л. Основы информационно-программного обеспечения георадиолокационных исследований состояния грунтов автодорог криолитозоны в режиме мониторинга / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров, А. С. Стручков, Д. В. Саввин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 7. — Спец. вып. 30 : Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр. — С. 325–332.
171. Федорова, Л. Л. Особенности обработки георадиолокационных данных при исследовании структуры геологических разрезов россыпных месторождений золота / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2009. — № S4. — Отд. вып. «Дальний Восток-1». — С. 99–106.
172. Федорова, Л. Л. Программа обработки данных радиолокационных зондирований ледяного покрова водоемов в дистанционном режиме "Радар-Лед" / Л. Л. Федорова, В. В. Попов. — Москва : ВНИИЦ, 2004. — № 50200401317.
173. Федорова, Л. Л. Программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в подповерхностных грунтах / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров, А. С. Стручков, Д. В. Саввин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — № 8. — Спец. вып. 21 : Проблемы комплексного освоения георесурсов. — С. 154–163.

174. Федорова, Л. Л. Решение задач обработки и интерпретации георадиолокационных данных на основе вейвлет-анализа / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № 8. — С. 153–158.
175. Федорова, Л. Л. Физическое моделирование георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в массиве рыхлых горных пород / Л. Л. Федорова, М. П. Федоров, А. С. Свинобоев // Успехи современного естествознания. — 2024. — № 11. — С. 106–111.
176. Финкельштейн, М. И. Подповерхностная радиолокация / М. И. Финкельштейн, В. И. Карпухин, В. А. Кутев, В. Н. Метелкин ; под редакцией М. И. Финкельштейна. — Москва : Радио и связь, 1994. — 216 с.
177. Финкельштейн, М. И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золотарев ; под редакцией М. И. Финкельштейна. — Москва : Недра, 1986. — 128 с.
178. Фролов, А. Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А. Д. Фролов. — Пущино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. — 607 с.
179. Хмелевской, В. К. Геофизические методы исследований : учебное пособие для геофизических специальностей вузов / В. К. Хмелевской, Ю. И. Горбачев, А. В. Калинин, М. Г. Попов, Н. И. Селиверстов, В. А. Шевнин. — Петропавловск-Камчатский : Издательство КГПУ, 2004. — 232 с.
180. Черемисин, А. А. Возможности сверхширокополосной георадиолокации низкоомных геологических сред / А. А. Черемисин, Ю. В. Васильев, В. В. Аленченко, М. И. Эпов, Р. Е. Тойб, И. С. Шнипов, С. В. Широков, В. Б. Болтинцев // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59, № 2. — С. 256–267.
181. 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: 26.01.2026)

182. Шац, М. М. Эх, дороги : [итоги инспекции Общероссийского народного фронта по качеству асфальтовых покрытий в РФ, в т.ч. г. Якутске] / М. М. Шац, Ю. Б. Скачков, А. П. Черепанова. — Якутск, 2016. — URL: <https://www.mpi.ysn.ru/ru/home/8-russkij-ru/struct/labs/844-log-news-eh-dorogi> (дата обращения: 08.08.2025).
183. Шепелев, В. В. Об инженерной защите территории г. Якутска от подтопления и обводнения / В. В. Шепелев, Ф. Е. Попенко // Наука и техника в Якутии. — 2007. — № 2 (13). — С. 15–18.
184. Шерифф, Р. Сейсморазведка : в 2 томах. Том 1 / Р. Шерифф, Л. Гелдарт ; перевод с английского Е. А. Ефимова. — Москва : Мир, 1987. — 447 с.
185. Шило, Н. А. Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей / Н. А. Шило. — 2-е изд., перераб. и доп. — Владивосток : Дальнаука, 2002. — 576 с.
186. Штерн, В. Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletschereis / В. Штерн. — Leipzig : Akademische Verlagsgesellschaft, 1929. — 42 с.
187. Электродинамика и распространение радиоволн : учебник для вузов / О. В. Осипов, Д. П. Табаков, С. В. Морозов. — Самара : ИНУЛ ПГУТИ, 2021. — 290 с.
188. Электромагнитные методы исследования криолитозоны : обзор / А. Т. Акимов, Т. М. Клишес, В. П. Мельников, А. М. Снегирев ; под редакцией В. Д. Бадалова ; АН СССР, Сибирское отделение, Институт мерзлотоведения. — Якутск, 1988. — 48 с.
189. Якубовский, Ю. В. Электроразведка : учебник для вузов / Ю. В. Якубовский, И. В. Ренард. — Москва : Недра, 1991. — 80 с.
190. Якупов, В. С. Геофизика криолитозоны : монография / В. С. Якупов ; рецензенты : Д. Д. Саввинов, В. А. Григорьев, В. В. Филиппов ; Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера. — Якутск : Издательство Якутского государственного университета, 2008. — 342 с.

191. Якупов, В. С. Исследование мерзлых толщ методами геофизики : монография / В. С. Якупов ; ответственный редактор С. А. Батугин ; рецензенты: В. Г. Алексеев, В. С. Имаев ; Институт горного дела Севера СО РАН. — Якутск : ЯФ Издательства СО РАН, 2000. — 336 с.
192. Alfuqara, D. Geophysical site assessment of soil and the rock structure in karst terrain using 2D and 3D mapping of noninvasive electrical resistivity tomography – southwestern of MO, USA / D. Alfuqara, N. Anderson // *Arabian Journal of Geosciences*. — 2023. — Vol. 16. — Article 103.
193. Annan, A. P. GPR – Trends, History, and Future Developments / A. P. Annan // *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. — 2002. — Vol. 3, no. 4. — P. 253–270.
194. Annan, A. P. Impulse Radar Sounding in Permafrost / A. P. Annan, J. L. Davis // *Radio Science*. — 1976. — Vol. 11, no. 4. — P. 383–394.
195. Annan, A. P. Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada / A. P. Annan, J. L. Davis, D. Gendzwill // *Geophysics*. — 1988. — Vol. 53, no. 12. — P. 1556–1564.
196. Apollo 17: Preliminary Science Report : NASA SP-330 / NASA. — Washington, D.C. : NASA, 1973. — 660 p.
197. Chen, H. T. Borehole directional radar system for geological mapping / H. T. Chen // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1989. — Vol. 51, no. 11-12. — P. 819–828.
198. Cook, J. C. Borehole-radar exploration in a coal seam / J. C. Cook // *Geophysics*. — 1977. — Vol. 42, no. 6. — P. 1254–1261.
199. Coon, J. B. Experimental uses of short pulse radar in coal seams / J. B. Coon, J. C. Fowler, C. J. Schafers // *Geophysics*. — 1981. — Vol. 46, no. 8. — P. 1163–1168.
200. Daniels, D. J. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / D. J. Daniels. — London : The Institution of Electrical Engineers, 2004. — 734 p.
201. Daniels, J. J. Ground Penetrating Radar Fundamentals : Appendix to a Report to the U.S. EPA, Region V / J. J. Daniels. — 2000. — 20 p.

202. Davis, J. L. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy / J. L. Davis, A. P. Annan // Geophysical Prospecting. — 1989. — Vol. 37, no. 5. — P. 531–551.
203. Fedorov, M. P. Identification of River Ice Cover Structure by Ground Penetrating Radar Data / M. P. Fedorov, L. L. Fedorova // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2022. — Vol. 19. — P. 1–5.
204. Fedorov, M. P. Investigation of the Lena river ice cover by GPR from helicopter / M. P. Fedorov, L. L. Fedorova, A. V. Omelyanenko // 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) : proceedings. — Shanghai, 2012. — P. 733–736.
205. 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 // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (Brussels, 30 June – 4 July 2014). — Brussels, 2014. — P. 301–305.
206. Fedorova, L. L. GPR Monitoring of Cryogenic Processes in Subgrade Soils / L. L. Fedorova, D. V. Savvin, M. P. Fedorov, A. S. Struchkov // GPR 2016 : 16th International Conference of Ground Penetrating Radar (Hong Kong, 13–16 June 2016). — Hong Kong, 2016.
207. Fedorova, L. L. Improvement GPR research of dredged polygons using the angular scanning technique / L. L. Fedorova, G. A. Kulyandin // Engineering and Mining Geophysics 2020 : 16th Conference and Exhibition (Perm, 14–18 September 2020). — Perm, 2020. — Vol. 2020. — P. 1–5.
208. Finkelstein, M. I. Radar aerial ice surveys of rivers, lakes and reservoirs / M. I. Finkelstein, E. I. Lazarev, A. N. Chizhov. — Leningrad : Gidrometeoizdat, 1984. — 150 p.
209. Finkelstein, M. I. The development of geophysical subsurface radar in the USSR and its practical use / M. I. Finkelstein // Proceedings of the Third International Conference on Ground Penetrating Radar. — Denver, 1990. — P. 4:25.

210. 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.
211. Francke, J. The design of an intrinsically safe ground penetrating radar for detecting abandoned workings in underground coal mines / J. Francke, V. Utsi, K. K. Singh // *Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. — Shanghai, 2012. — P. 125–130.
212. Francke, J. The role of ground penetrating radar in bauxite resource evaluations / J. Francke // *Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. — Shanghai, 2012. — P. 459–463.
213. GeoScan32 : руководство пользователя. — Санкт-Петербург : ГеоДевайс, 2020. — URL: [https://propribory.ru/static/upl/08-12-2021/QvMOKJrOnpUPQYsP/rje\\_geoscan\\_v.02.12.2020.pdf](https://propribory.ru/static/upl/08-12-2021/QvMOKJrOnpUPQYsP/rje_geoscan_v.02.12.2020.pdf) (дата обращения: 17.03.2025).
214. Giannopoulos, A. Modelling Ground-Penetrating Radar by GprMax / A. Giannopoulos // *Construction and Building Materials*. — 2005. — Vol. 19, no. 10. — P. 755–762.
215. Herkelrath, W. N. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry / W. N. Herkelrath, S. P. Hamburg, F. Murphy // *Water Resources Research*. — 1991. — Vol. 27, no. 5. — P. 857–864.
216. Hermance, J. F. Ground-penetrating radar: Postmigration stacking of n-fold common midpoint profile data / J. F. Hermance // *Geophysics*. — 2001. — Vol. 66, no. 2. — P. 648–659.
217. Huber, E. RGPR: An open-source package to process and visualize GPR data / E. Huber, G. Hans // *Proceedings of the 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. — Rapperswil, 2018. — P. 1–4.
218. Huisman, J. A. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar / J. A.

- Huisman, C. Sperl, W. Bouten, J. M. Verstraten // *Journal of Hydrology*. — 2001. — Vol. 245, no. 1–4. — P. 48–58.
219. Johns, P. B. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix / P. B. Johns, R. L. Beurle // *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. — 1971. — Vol. 118, no. 9. — P. 1203–1208.
220. Jol, H. M. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* / H. M. Jol. — Amsterdam : Elsevier, 2009. — 524 p.
221. Kgarume, T. The use of 3D ground penetrating radar to mitigate the risk associated with falls of ground in Bushveld Complex platinum mines / T. Kgarume, M. van Schoor, Z. Nontso // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. — 2019. — Vol. 119, no. 1. — P. 77–84.
222. Klewe, T. Review of moisture measurements in civil engineering with ground penetrating radar – Applied methods and signal features / T. Klewe, C. Strangfeld, S. Kruschwitz // *Construction and Building Materials*. — 2021. — Vol. 278. — Article 122224.
223. Klinedinst, D. The Use of 3D Ground Penetrating Radar to Mitigate the Risk Associated with Falls of Ground / D. Klinedinst, K. Luxbacher, S. Ragab // *International Journal of Mining Science and Technology*. — 2019. — Vol. 29, no. 1. — P. 139–144.
224. Kogelnik, H. On the propagation of Gaussian beams of light through lenslike media including those with a loss or gain variation / H. Kogelnik // *Applied Optics*. — 1965. — Vol. 4, no. 12. — P. 1562–1569.
225. Kulyandin, G. A. GPR mapping of bedrock of alluvial gold deposits in permafrost / G. A. Kulyandin, L. L. Fedorova, D. V. Savvin, N. D. Prudetskii // *Proceedings of the 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2016)*. — Hong Kong, 2016.
226. Kulyandin, G. A. Methods of GPR Angular Scanning / G. A. Kulyandin, A. V. Omelyanenko, P. A. Omelyanenko // *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2014) (Brussels, 30 June – 4 July 2014)*. — Brussels, 2014. — P. 590–593.

227. Kunz, K. S. The finite difference time domain method for electromagnetics / K. S. Kunz, R. I. Luebbers. — Boca Raton : CRC Press, 1993. — 448 p.
228. Lambot, S. An overview on down-looking UAV-based GPR systems / S. Lambot, L. Weihermüller, J. A. Huisman, H. Vereecken // Proceedings of the 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2016). — Hong Kong, 2016. — P. 1–4.
229. Lambot, S. Measuring the soil water content profile of a sandy soil with an off-ground monostatic ground penetrating radar / S. Lambot, J. Rhebergen, I. van den Bosch [et al.] // Vadose Zone Journal. — 2004. — Vol. 3, no. 4. — P. 1063–1071.
230. Lampe, B. A finite-difference time-domain simulation tool for ground-penetrating radar antennas / B. Lampe, K. Holliger, A. G. Green // Geophysics. — 2003. — Vol. 68, no. 3. — P. 971–987.
231. Laurens, S. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling / S. Laurens, J. P. Balayssac, J. Rhazi [et al.] // Materials and Structures. — 2005. — Vol. 38, no. 283. — P. 827–832.
232. Ledieu, J. A method of measuring soil moisture by time domain reflectometry / J. Ledieu, P. De Ridder, P. De Clerck, S. Dautrebande // Journal of Hydrology. — 1986. — Vol. 88, no. 3-4. — P. 319–328.
233. Loeffler, O. Ground penetrating radar measurements in a controlled vadose zone: Influence of the water content / O. Loeffler, M. Bano // Vadose Zone Journal. — 2004. — Vol. 3, no. 4. — P. 1082–1092.
234. 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 [et al.] // Developmental planning of placer minerals. — New Delhi : Allied Publications, 2005. — P. 71–79.
235. Löwy, H. Eine elektrodynamische Methode zur Erforschung des Erdinneren (Zweite Mitteilung) / H. Löwy, G. Leimbach // Physikalische Zeitschrift. — 1912. — Bd. 13, Nr. 9. — S. 397–404.

236. Löwy, H. Methode zur Aufspürung verborgener Gegenstände : Patent DE 237944 / H. Löwy, G. Leimbach ; Deutsches Patent- und Markenamt. — 1910.
237. Lunt, I. A. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data / I. A. Lunt, S. S. Hubbard, Y. Rubin // *Journal of Hydrology*. — 2005. — Vol. 307, no. 1-4. — P. 254–269.
238. Minet, J. Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field-scale soil moisture mapping / J. Minet, S. Lambot, E. Slob [et al.] // *Journal of Hydrology*. — 2012. — Vol. 424–425. — P. 112–123.
239. Morey, R. M. Continuous subsurface profiling by impulse radar / R. M. Morey // *Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*. — New York, 1974. — P. 213–232.
240. Olhoeft, G. R. Selected Bibliography on Ground Penetrating Radar / G. R. Olhoeft // *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP)*. — 1988. — P. 462–520.
241. Olsson, O. Borehole directional radar detection of subsurface cavities / O. Olsson, L. Falk, O. Forslund [et al.] // *Geophysical Prospecting*. — 1987. — Vol. 35, no. 7. — P. 1009–1019.
242. Plattner, A. M. GPRPy: Open-source ground-penetrating radar processing and visualization software / A. M. Plattner // *The Leading Edge*. — 2020. — Vol. 39, no. 5. — P. 332–337.
243. Ralston, J. C. Use of ground penetrating radar in underground coal mining / J. C. Ralston, D. W. Hainsworth // *Proceedings of SPIE 4084: Subsurface Sensing Technologies and Applications II*. — 2000. — Vol. 4084. — P. 731–736.
244. Robin, G. de Q. Interpretation of radio echo sounding in polar ice sheets / G. de Q. Robin, S. Evans, J. T. Bailey // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. — 1969. — Vol. 265, no. 1166. — P. 437–505.
245. Саввин Д. В., Федорова Л. Л., Куляндин Г. А. = Savvin, D. V. Geophysical studies of permafrost conditions of the Kangalassky coal mine dam

/ D. V. Savvin, L. L. Fedorova, G. A. Kulyandin // Известия высших учебных заведений - Горный журнал. — 2022. — № 4. — С. 38–46. — DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-38-46

246. Savvin, D. V. GPR studies of the permafrost conditions of the main pipeline area in Western Yakutia / D. V. Savvin, L. L. Fedorova, G. A. Kulyandin, E. E. Soloviev // Engineering and Mining Geophysics 2021 : 17th Conference and Exhibition (Gelendzhik, 26–30 April 2021). — Gelendzhik : EAGE, 2021. — P. 1–5.

247. Sokolov, K. Prospecting and Evaluation of Underground Massive Ice by Ground-Penetrating Radar / K. Sokolov, L. Fedorova, M. Fedorov // Geosciences. — 2020. — Vol. 10, no. 7. — Article 274.

248. Stein, E. Some GPR results in salt and potash mines / E. Stein, A. Lambrecht, C. Müller // Proceedings of the 9th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2002) (Santa Barbara, 29 April – 2 May 2002). — Santa Barbara, 2002. — P. 657–660.

249. Taflove, A. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove, S. C. Hagness. — 3rd ed. — New York : Artech House, 2005. — 1006 p.

250. Thierbach, R. Electromagnetic reflections in salt deposits / R. Thierbach // Journal of Geophysics. — 1974. — Vol. 40. — P. 633–637.

251. Topp, G. C. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines / G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan // Water Resources Research. — 1980. — Vol. 16, no. 3. — P. 574–582.

252. Unterberger, R. R. Radar propagation in rock salt / R. R. Unterberger // Geophysics. — 1978. — Vol. 43, no. 5. — P. 1047–1054.

253. Warren, C. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar / C. Warren, A. Giannopoulos, I. Giannakis // Computer Physics Communications. — 2016. — Vol. 209. — P. 163–170.

254. Wilchek, L.-A. Ground penetrating radar for detection of rock structure : PhD thesis / L.-A. Wilchek. — Edmonton : University of Alberta, 2000. — 284 p.
255. Workshop on Geology of the Apollo 17 Landing Site / edited by G. Ryder, H. H. Schmitt, P. D. Spudis. — Houston : Lunar and Planetary Institute, 1992. — (LPI Technical Report ; 92-09). — URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930009597> (дата обращения: 18.01.2026).
256. Wu, K. Ground-Penetrating Radar Full-Wave Inversion for Soil Moisture Mapping in Trench-Hill Potato Fields for Precise Irrigation / K. Wu, H. Desesquelles, R. Cockenpot [et al.] // Sensors. — 2022. — Vol. 22, no. 3. — Article 1041.
257. Yee, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K. S. Yee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1966. — Vol. AP-14, no. 3. — P. 302–307.
258. Zhang, Y. GPR Clutter Removal Based on Weighted Nuclear Norm Minimization / Y. Zhang, J. Zhang, J. Li, L. Zhu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2021. — Vol. 59, no. 5. — P. 3988–4000.
259. Zhu, L. GPR Image Clutter Suppression Using Gaussian Curvature Decomposition in the PCA Domain / L. Zhu, J. Zhang, J. Li, Y. Zhang // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2022. — Vol. 19. — Article 4509405.