

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ИМ. Н.А. ЧИНАКАЛА

*На правах рукописи*

**Хмелинин Алексей Павлович**

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО  
МЕТОДА ДЛЯ ВЫБОРА МЕСТА ЗАЛОЖЕНИЯ СКВАЖИН  
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА  
ИХ БУРЕНИЯ**

Специальность 25.00.16 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая  
геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
Виктор Николаевич Опарин

Новосибирск – 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>Глава 1. Обзор методов оценки напряженного состояния и физико-механических свойств породных массивов.</b>	
<b>Цель работы и задачи исследований</b> .....	11
1.1. Геомеханические методы определения напряжённого состояния породных массивов .....	16
1.2. Геофизические методы определения напряжённого состояния породных массивов и их физико-механических свойств .....	26
1.3. Георадиолокационный метод и аппаратура для проведения экспериментов. Области применения в горном деле .....	38
1.4. Акустический метод определения координат источника ударного воздействия на породный массив .....	43
1.5. Цель работы и задачи исследований .....	47
<b>Глава 2. Глубинность георадиолокационного метода при проведении геомеханического контроля состояния подземных горных выработок с железобетонной крепью</b> .....	51
2.1. Электрические параметры геосред, их классификация и частотная зависимость .....	52
2.2. Оценка предельной дальности обнаружения арматуры в железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом	56
2.3. Влияние нарушенности и влажности массива вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив» на глубинность георадиолокационного метода .....	63
Выводы .....	75
<b>Глава 3. Применение метода георадиолокации для выбора мест заложения скважин геомеханических измерений</b> .....	77
3.1. Обоснование применимости метода георадиолокации для выбора мест заложения скважин геомеханических измерений .....	77

3.2. Разработка методики георадиолокационного обследования железобетонной крепи подземных горных выработок на наличие в ней механических неоднородностей .....	80
3.3. Апробация методики георадиолокационного обследования в реальных условиях горного производства .....	88
3.4. Обработка и анализ результатов натурного эксперимента .....	91
Выводы .....	101
<b>Глава 4. Разработка технических средств контроля процесса бурения измерительных скважин .....</b>	<b>104</b>
4.1. Разработка алгоритма и основанного на нем технического средства для определения пространственных координат ударного породоразрушающего инструмента .....	105
4.2. Апробация алгоритма в натуральных условиях. Выбор измерительной аппаратуры .....	114
4.3. Результаты испытаний многоканальной акустической измерительной системы в натуральных условиях .....	124
4.4. Разработка технического средства для определения направления поворота рабочего органа относительно оси его движения .....	127
Выводы.....	132
<b>Заключение .....</b>	<b>134</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>136</b>
<b>Приложение А: Георадар SIR-3000: технические параметры, комплектация .....</b>	<b>147</b>
<b>Приложение Б: Многоканальный измерительный комплекс PULSE: технические параметры, комплектация .....</b>	<b>153</b>
<b>Приложение В: Табличные и иллюстративные материалы натуральных экспериментов .....</b>	<b>157</b>
<b>Приложение Г: Документы, разработанные в рамках выполнения диссертации .....</b>	<b>162</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Проходка скважин широко используется в горном деле и строительстве не только для технологических целей при добыче полезных ископаемых, но и для диагностики и контроля напряжённо-деформированного состояния массивов горных пород, получения непосредственной информации об их физико-механических свойствах. Велика роль такого рода информации для оценки остаточного ресурса крепей капитальных горных выработок – весьма важных подземных сооружений, отвечающих за устойчивость горных выработок в условиях повышенного горного давления или в ослабленных зонах тектонических нарушений породных массивов.

Так, для оценки, например, остаточного ресурса железобетонной крепи необходима информация о прочностных свойствах бетона, которые обычно определяются на основе лабораторных испытаний кернов на растяжение и сжатие, а также о действующих в крепи напряжениях. Бурение специальных скважин геомеханических и горно-геофизических измерений позволяет наиболее точно оценить действующие в крепи и окрестном породном массиве напряжения. При пересчете результатов измерений в значения действующих напряжений, как правило, предполагается, что исследуемый участок крепи представляет собой сплошную, изотропную, линейно-упругую, однородную геосреду. Однако, наличие естественных и искусственных механических неоднородностей (пустоты, зоны разуплотнения, металлическая арматура) в местах проведения инструментальных геомеханических измерений может искажать получаемые результаты. Это, в свою очередь, может повлиять на достоверность экспериментальных данных и, как следствие, вызвать ошибки в проектных расчетах. Поэтому выбор места заложения измерительных скважин при исследовании НДС сплошных бетонных и железобетонных крепей является актуальной научной задачей.

При этом следует также учитывать, что на возможность проведения инструментальных геомеханических измерений и достоверность их результатов влияет искривление ствола скважины. Поэтому при бурении измерительных скважин отечественными буровыми станками ударного действия необходимо отслеживать искривления ствола создаваемой скважины, и, следовательно, требуются системы контроля местоположения буровых снарядов, позволяющие получать информацию в режиме реального времени. Повышенные издержки, связанные с необходимостью повторного бурения и затратами на замену породоразрушающих инструментов могут быть минимизированы применением управляемых рабочих органов с системой определения их координат.

Существующие зарубежные и отечественные контрольно-измерительные системы (фирмы Digital Control Inc., НПИ «Сенсе»; системы Eclipse, МагСтир, SNS-200, SNS-300 и т.п.), применяемые в системах горизонтального направленного бурения, определяют координаты буровых снарядов с помощью установленных в них передающих антенн, сигналы от которых принимаются на поверхности земли, позволяя вычислить искомые координаты. Однако использование данных систем в установках ударно-вращательного бурения весьма ограничено, поскольку передающие антенны подвержены значительным ударным перегрузкам, что приводит к их быстрому выходу из строя. Более рациональным является использование непосредственно создаваемых буровым снарядом породоразрушающей машины акустических импульсных сигналов на поверхности обнажения. Их регистрация и анализ позволяют устанавливать местоположение бурового снаряда, а следовательно, и забоя проходимой скважины.

Таким образом, необходимость получения комплексной информации о физико-механических свойствах геоматериалов и одновременно – о местоположении буровых снарядов при бурении скважин геомеханического контроля свидетельствует об актуальности темы диссертационных исследований.

Диссертационные исследования выполнялись в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (государственные контракты: №П1117 от 02 июня 2010 года, рук. к.т.н. Денисо-

ва Е.В.; № 02.740.11.0819 от 24 апреля 2010 года, рук. д.т.н. Смоляницкий Б.Н., №8318 от 17 августа 2012 года, рук. к.т.н. Неверов С.А.) и были отмечены стипендией Правительства Новосибирской области в 2012 году.

Результаты диссертационной работы могут применяться на горных предприятиях страны для обоснованного выбора места заложения измерительных скважин геомеханического контроля сплошных бетонных и железобетонных крепей, а также для контроля процесса бурения измерительных скважин. В строительстве могут применяться результаты, составляющие второй этап Комплексного метода – для контроля процесса проходки горизонтальных скважин при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций в грунтовом массиве.

**Объект исследований** – геосреда с механическими неоднородностями во взаимодействии с породоразрушающей машиной в процессе бурения скважин.

**Предмет исследований** – параметры распространения электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона и акустических волн в геоматериалах.

**Цель работы** – разработка комплексного геофизического метода для выбора места расположения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения в геосредах, позволяющего исключить попадание породоразрушающего инструмента буровой машины ударного действия в закрепные пустоты приконтурного массива и в места локализации арматуры в железобетонной крепи подземных выработок, а также определять его пространственные координаты.

**Идея работы заключается** в использовании электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона для выявления искусственных и естественных механических неоднородностей по электрофизическим свойствам геосреды, а акустических волн – для определения направления бурения скважины, сооружаемой породоразрушающими машинами ударного действия.

**Задачи исследований:**

1. Исследовать влияние нарушенности и влажности закрепного пространства на глубинность георадиолокационного обследования зоны контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» методом физического моделирования;

2. Разработать и обосновать методику обследования участка железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом для выбора места заложения измерительных скважин геомеханического контроля;

3. Разработать и исследовать экспериментальный образец многоканальной акустической измерительной системы определения местоположения рабочего органа буровой машины ударного действия для контроля процесса и направления бурения горизонтальных скважин в грунтовом массиве в режиме реального времени.

**Научная новизна исследований заключается в:**

– разработке методики обследования участка железобетонной крепи подземных горных выработок георадиолокационным методом, позволяющей выбирать места, пригодные для бурения измерительных скважин геомеханического контроля, исключая попадание ствола скважины в зоны локализации механических неоднородностей;

– разработке алгоритма определения пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия и его реализации в многоканальной акустической измерительной системе, позволяющей осуществлять контроль процесса бурения скважин;

– разработке технического средства для определения направления поворота рабочего органа буровой машины вокруг оси движения в процессе проходки скважины

**Теоретическая значимость работы** заключается в обосновании и оценке предельной дальности метода георадиолокации при обследовании механического состояния железобетонной крепи подземных горных выработок и разработке метода определения направления поворота бурового снаряда относительно оси движения с использованием системы ртутных датчиков.

**Практическая ценность исследования** состоит в обосновании методических подходов для выбора мест бурения измерительных скважин геомеханического контроля в железобетонных крепях горных выработок; разработке и реализации технических средств, позволяющих определять направление поворота рабочего органа

буровой машины ударного действия вокруг оси движения и его пространственные координаты.

**Методы исследований** включают анализ научных и научно-технических источников информации в выбранном направлении исследований, теоретические расчеты, экспериментальные лабораторные и натурные исследования динамико-кинематических характеристик высокочастотных электромагнитных и акустических сигналов в геосредах, современные способы обработки экспериментальных данных геофизических измерений.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. При фиксированной частоте 2600 МГц зондирующего сверхвысокочастотного электромагнитного сигнала увеличение линейных размеров фракций нарушенного массива вмещающих пород в зоне механического контакта «железобетонная крепь – массив» до величин, соразмерных с длиной волны, приводит к снижению дальности действия георадиолокационного метода на 19%; при увеличении отношения диэлектрических проницаемостей бетона крепи и зоны нарушения на контакте «крепь – массив» до 1:4 дальность действия георадиолокационного метода уменьшается на 30%;

2. Разработанная методика обследования участка железобетонной крепи георадиолокационным методом позволяет выбирать места заложения измерительных скважин геомеханического контроля на основе 2D карт локализации обнаруженных механических неоднородностей, построенных по результатам георадарного обследования и анализа волновой структуры полученных радарограмм.

3. Разработанная многоканальная акустическая измерительная система позволяет определять пространственные координаты рабочего органа пневмоударной машины, движущейся в грунте, и контролировать процесс проходки скважины с погрешностью не более 12%, основываясь на вычислении времен задержки поступления акустического импульсного сигнала, индуцируемого пневмоударной машиной и регистрируемого на поверхности земли, относительно сигнала непосредственно с машины.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:**

- использованием для проведения модельных и натуральных экспериментов современной аппаратуры с высокими метрологическими характеристиками;
- использованием современных методов теоретического анализа и значительным объемом экспериментальных данных;
- соответствием данных натурального обследования железобетонной обделки подземных горных выработок георадиолокационным методом данным контрольного бурения скважин;
- удовлетворительной точностью определения местоположения буровой машины ударного действия с помощью многоканальной акустической измерительной системы, реализованной на основе разработанного алгоритма определения пространственных координат источника акустического импульсного сигнала.

**Личный вклад автора состоит в** выполнении теоретических расчетов дальности обнаружения металлической арматуры в бетоне; выполнении физического моделирования процесса георадиолокационного обследования механического состояния вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив»; разработке порядка обследования участка железобетонной крепи подземной горной выработки георадиолокационным методом для выбора места проходки измерительных скважин геомеханического контроля, его апробация в натуральных условиях действующего горного предприятия; разработке алгоритма вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия; разработке многоканальной акустической измерительной системы на основе указанного алгоритма; выполнении натуральных испытаний работоспособности предложенного алгоритма и многоканальной акустической измерительной системы; разработке технического средства определения угла поворота рабочего органа пневмоударной машины вокруг оси движения.

**Реализация результатов работы.** С помощью разработанного Комплексного метода ООО «Регион Строй-Монтаж» сооружен подземный переход для подвода коммуникаций к малоэтажному строению. На одном из горных предприятий Крас-

ноярского края выполнено обследование трех подземных камер с железобетонной крепью, даны рекомендации по выбору мест проходки измерительных скважин геомеханического контроля. Разработана методика георадиолокационного обследования железобетонной крепи подземных горных выработок на наличие в ней механических неоднородностей.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на международных научных симпозиумах XIII и XV «Проблемы геологии и освоения недр» им. академика М.А. Усова (Томск, 2009, 2011 гг.), международной научно-практической конференции «Четвертые Уткинские чтения» (Санкт-Петербург, 2009 г.), 5-ой Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2010 г.), международной научно-практической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2011 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2012 г.), научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2012, 2013, 2014 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2013» (Новосибирск, ИГД СО РАН, 2013 г.), Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2013, 2014 гг.), Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции «Науки о Земле. Современное состояние» (Новосибирск, 2014).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 5 в журналах, входящих в перечень ВАК, получен 1 патент РФ на изобретение и 1 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 135 страницах машинописного текста, содержит 18 таблиц, 52 рисунка; список литературных источников из 107 наименований, имеется 4 приложения.

Автор благодарен своему научному руководителю чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессору В.Н. Опарину за помощь в выборе темы работы и проведении исследований, за требовательность к качеству работы; выражает признательность к.т.н. Е.В. Денисовой и Б.Е. Беланову за помощь и внимание к работе.

# **ГЛАВА 1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ. ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В связи с наблюдаемым в последние десятилетия уменьшением разведанных запасов полезных ископаемых удобных и наиболее простых для разработки (по горно-геологическим, экономическим показателям), истощением существующих, ведение горных работ переводится на всё более глубокие горизонты [1]. Горно-технологические условия, в которых осуществляется добыча полезных ископаемых, становятся все более сложными, что требует повышенных капитальных затрат на проведение очистных работ и обеспечение безопасности горного производства. Перед отраслью уже в современных условиях стоит актуальная и непростая проблема освоения георесурсов на больших глубинах и в сложных природных условиях с повышением экономической эффективности горных работ [2].

В условиях постоянно возрастающей глубины разработки месторождений полезных ископаемых горно-добычные работы нарушают напряжённо-деформированное состояние нетронутого вмещающего породного массива. Перераспределение действующих в массиве напряжений может негативно влиять на устойчивость подземных выработок, что влечет капитальные затраты на их крепление и необходимость постоянного контроля состояния указанных сооружений. Сложность горно-геологических условий также существенно влияет на устойчивость горных выработок и предъявляет достаточно жесткие требования к проектированию подготовительных и очистных работ при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

Особое внимание необходимо уделять геомеханическому контролю состояния применяемых крепей и закрепного пространства. Своевременное выявление мест

концентрации напряжений, зон разуплотнения вмещающих пород позволяет предотвратить или значительно снизить вероятность динамических форм проявления горного давления и, следовательно, минимизировать затраты на восстановительные работы, избежать простоев горного производства; избежать человеческих жертв, вызванных горными ударами и сопутствующими негативными факторами.

Таким образом, развитию современных оперативных методов неразрушающего контроля устойчивости капитальных подземных сооружений должно уделяться достаточное внимание исследователями. Так, в работах [3-5] указывается на необходимость проведения непрерывных во времени наблюдений за информативными параметрами состояния подземных сооружений, их обделки и закрепного пространства с целью обеспечения безопасности горного производства и прогнозирования остаточного срока эксплуатации указанных объектов. В настоящее время эта проблема в достаточной мере не решена, поскольку существующие методы оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород трудоемки и требуют значительных финансовых затрат [3-5].

Для получения достоверных данных измерений при оценке НДС применяемых бетонных и железобетонных крепей и массивов вмещающих пород некоторыми методами важно выполнение определенных требований, предъявляемых к геосреде, таких как изотропия, линейная упругость, сплошность, однородность. Для эффективной оценки состояния искусственного массива, снижения времени и финансовых затрат на проведение исследований требуется высокая точность бурения измерительных скважин, а также сведений об их расположении относительно механических неоднородностей и областей разуплотнения геосреды, так как попадание измерительной скважины в зону нарушенности массива или в полость часто приводит к недостоверности результатов измерений. Следовательно, потребуется повторное бурение, значительно снижающее эффективность мероприятия.

Актуальной в настоящее время является задача оперативной локализации металлической арматуры при проведении обследования обделки капитальных подземных выработок для прогнозирования их механического состояния и остаточного срока службы.

Как известно [6], обделка капитальных горных выработок бывает монолитной бетонной и железобетонной. Первый тип крепи широко применяется в угольной и горнорудной промышленности при возведении подземных сооружений в породах малой крепости. Областью эффективного применения бетонной крепи являются подземные сооружения с относительно небольшими смещениями контура, поскольку бетон, образуя жесткую конструкцию, склонен к быстрому разрушению при интенсивных смещениях вмещающих пород [6].

Монолитная железобетонная крепь с высокой несущей способностью применяется в самых тяжелых горно-геологических условиях. В качестве арматуры в железобетонной крепи применяются различные металлоконструкции на основе двутавровых балок, стальных стержней различного сечения (от 6 до 90 мм), а также арматурно-опалубочные листы. При этом необходимо обеспечивать достаточно малый шаг армирования, чтобы железобетонная конструкция соответствовала расчетным параметрам несущей способности. Мощность крепи может принимать значения от 0,5 м до 3 и более метров в зависимости от условий эксплуатации подземного сооружения [6].

Так, при попадании арматуры в створ измерительной скважины геомеханического контроля значительно снижается срок службы буровой коронки, искривляется форма скважины, что может помешать проведению экспериментальных исследований из-за невозможности размещения измерительного оборудования в скважине и, следовательно, потребовать повторного бурения. Необходимо также учитывать, что при переходе от экспериментально полученных данных к действующим в массиве напряжениям пока не представляется возможным учесть изменения начальных условий, вызванных попаданием неоднородностей в забой скважины [7].

Не менее актуальной задачей при оценке остаточного ресурса эксплуатации подземных сооружений с железобетонной крепью является определение состояния механического контакта «крепь – массив вмещающих пород». Во многих проектных решениях не допускается наличие пустот и незаполненных полостей между массивом вмещающих пород и крепью. Обнаружение и локализация указанных дефектов является достаточно сложной задачей, решение которой классическими методами

часто бывает трудоемким и не всегда эффективным. В этом аспекте, методы неразрушающего контроля механического состояния массива горных пород и применяемых железобетонных крепей представляются весьма перспективными.

Следует отметить, что в настоящее время серийно выпускается много приборов для оценки механического состояния породных массивов, созданных на различных физических принципах измерений, в том числе на основе приема и обработки акустических и электромагнитных колебаний. Однако широкое внедрение указанных средств измерений в горном производстве ограничивается отсутствием необходимых методических разработок для их конкретного применения, которые бы учитывали разнообразные горно-геологические условия, в которых ведется разработка месторождений полезных ископаемых. В России, по существу, отсутствуют нормативные документы, регламентирующие применение указанных средств измерений в горном производстве, и нормативно-методические материалы для успешного их внедрения для повышения безопасности ведения горных работ.

Рассмотрим обзор методов определения НДС породных массивов в окрестностях подземных горных выработок, получивших широкое практическое применение. Большинство из них связано с выполнением работ по бурению в геоматериале измерительных скважин.

В настоящее время для решения прикладных задач геомеханики разработано большое количество методов контроля и оценки напряжённо-деформированного состояния породных массивов и обделки горных выработок, называемых методами геоконтроля [3], которые можно разделить на три основные группы: геологические, геомеханические и геофизические [4]. Сводная классификация методов оценки и контроля НДС массивов приведена в таблице 1.1 на основе [4-6, 8-11].

К первой группе относятся методы, основанные на анализе общей геологической обстановки, а также на визуальном осмотре горных выработок, деформированных под действием горного давления. Как правило, такие методы способны дать лишь качественную оценку действующих напряжений и характеризуются малой трудоемкостью.

ТАБЛИЦА 1.1 – Классификация методов контроля НДС массива горных пород [4-7, 9-11]

Геологические методы	Геомеханические методы	Геофизические методы
Анализ геологических и геотектонических особенностей массива	Метод полной разгрузки керна	Ультразвуковой метод
	Метод частичной разгрузки	Электрометрические методы
	Метод частичной разгрузки на большой базе	
	Метод щелевой разгрузки	Методы, основанные на использовании эффектов памяти в горных породах и помещаемых в массив композиционных материалах
Оценка НДС на основе визуального осмотра горных выработок	Метод параллельных скважин	Звукометрические методы
	Метод разности давлений	
	Метод упругих включений	
Оценка НДС массива по дискованию керна	Метод гидроразрыва	Методы, основанные на приеме и анализе интенсивности электромагнитной эмиссии горных пород
	Метод компенсационной нагрузки	
	Метод буровых скважин	Гамма-метод
	Метод плоских домкратов	

Ко второй группе относятся методы, в большинстве своем основанные на непосредственном измерении деформационных процессов в локальной области массива. Они, как правило, обладают относительно высокой точностью определения напряжений, однако являются весьма трудоемкими и зачастую требующими дополнительного лабораторного определения физико-механических свойств горных пород.

К третьей группе относятся геофизические методы, основанные на изучении взаимосвязи природы, структуры, пространственной и временной изменчивости естественных и искусственных физических полей в массиве с действующими в нем напряжениями. Такие методы позволяют производить контроль как ограниченных, так и сравнительно больших объемов массива. Точность определения абсолютных значений действующих напряжений достаточно низка, в то же время они информативны при изучении динамики напряжений во времени и пространстве [4].

Рассмотрим более подробно геомеханические и геофизические методы оценки НДС массива горных пород.

## 1.1. Геомеханические методы определения напряжённого состояния породных массивов

### *Метод полной разгрузки керна*

Этот метод включает в себя несколько вариантов исследования состояния НДС массива при полной разгрузке керна. В общем случае, данный метод основан на использовании характеристик упругого восстановления формы элемента массива при искусственном нарушении его связи с основным массивом [12-17]. При этом предполагается, что породный массив рассматривается как упругий, сплошной, изотропный [7].

По техническому обеспечению и методике проведения натуральных измерений метод полной разгрузки можно подразделить на три основных типа [4]:

- схема ВНИМИ (измерение деформации торца керна, обуренного кольцевой щелью);
- схема Н. Хаста (измерение изменения диаметра центрального отверстия, пробуренного в керне, разгруженном кольцевой щелью);
- схема Е. Лимана (измерение деформаций центрального отверстия, пробуренного в керне, разгруженном кольцевой щелью).

Схемы проведения оценки напряжений в массиве методами полной разгрузки приведены на рисунке 1.1.

Связь между экспериментально измеренными деформациями и напряжениями, действующими в исследуемом массиве горных пород устанавливается на основе существующих решений краевых задач теории упругости для плоскости с круговым вырезом. При этом необходимым условием применимости метода является наличие информации об упругих константах горных пород [4].

Для исключения измерения напряжений, действующих на обнажении, а также влияния приконтурной зоны массива, необходимо бурить измерительные скважины на достаточно большие глубины (600 – 800 мм).

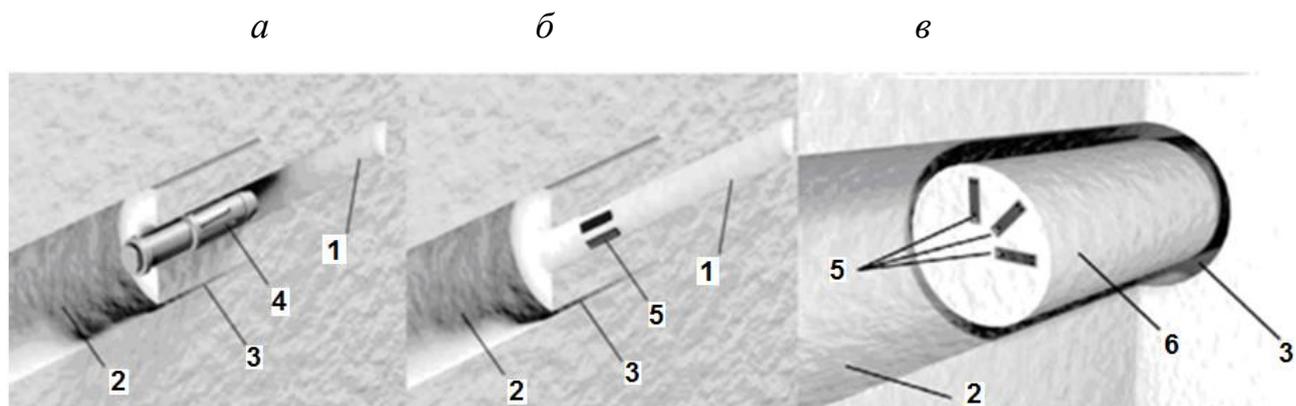


Рисунок 1.1 – Типы проведения натуральных испытаний методом полной разгрузки: а – по схеме Хаста; б – по схеме Лимана; в – по схеме ВНИМИ: 1 – опережающая скважина; 2 – разгрузочная скважина; 3 – кольцевая щель; 4 – скважинный деформометр; 5 – тензодатчики; 6 – обуренный керн

Кроме того, использование метода полной разгрузки керна невозможно в сильнотрещиноватых массивах, а также в породах, не соответствующих линейно-упругой модели деформирования [4,5,8].

#### *Группа методов возмущения*

Далее рассмотрим группу методов возмущения, к которым относятся методы частичной и щелевой разгрузки, а также метод параллельных скважин, метод разности давлений [8].

Методы **частичной разгрузки** характеризуются относительно низкой трудоёмкостью по сравнению с методами полной разгрузки, однако позволяют определять значения напряжений только вблизи горной выработки. Кроме того, на их точность влияют погрешности определения упругих характеристик горных пород в месте проведения исследований. Метод частичной разгрузки имеет несколько модификаций [4, 8]:

- метод разгрузки с наклеиванием тензодатчиков;
- метод разгрузки с использованием съемных тензометров;
- метод разгрузки на большой базе.

**Метод частичной разгрузки на большой базе** основан на том, что горную выработку можно рассматривать как скважину и при продвижении забоя стенки выра-

ботки по ее длине будут деформироваться неодинаково. У забоя деформация их минимальная, а когда забой подвинется на величину не менее диаметра выработки – максимальная. При этом у забоя она составляет 20-40% полной деформации стенок выработки на расстоянии диаметра от ее забоя [8, 18].

Погрешности методов частичной разгрузки зависят от погрешностей измерения исходных величин. Предельная случайная относительная погрешность определяемых напряжений, равная удвоенной средней погрешности измерения исходных величин, не превышает 8%. Такая точность вполне достаточна для решения практических задач при определении напряжений на обнажениях массива крепких горных пород, а также в крепи стволов [8].

**Метод разности давлений** позволяет непосредственно измерить изменение средней величины напряжения (увеличение или уменьшение), нормального к поверхности скважины. Он отличается простотой, надежностью, однако не позволяет определить абсолютное значение напряжения, а также направление максимального и минимального напряжений. Широко применяется в натурных исследованиях напряженно-деформированного состояния массива горных пород, в частности при определении параметров зон опорного давления и разгрузки [5]. Метод разности давлений применяется главным образом для определения дополнительных напряжений в массиве, возникающих в результате ведения горных работ.

**Метод щелевой разгрузки** является одним из видов методов разгрузки, основанных на оценке деформаций массива после нарушения его сплошности [19-22]. По сравнению с методами разгрузки керна метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений, так как зона разгрузки достигает трех размеров щели.

Сущность метода состоит в образовании в массиве щели и измерении деформаций ее стенок [4]. Схема измерений представлена на рисунке 1.2.

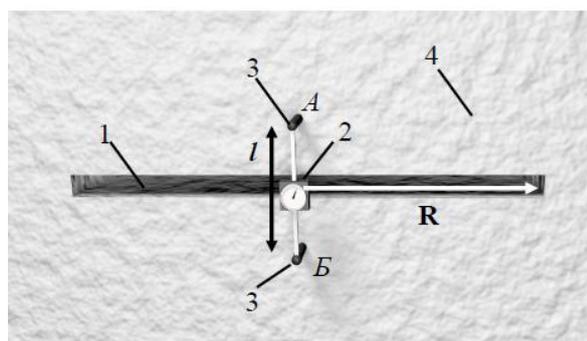


Рисунок 1.2 – Схема щелевой разгрузки: 1 – щель; 2 – деформометр; 3 – реперы; 4 – массив горных пород

Разработанный в ИГД СО РАН метод **параллельных скважин** [23-25] позволяет оценивать напряжения, действующие не только в области влияния выработки, но и в глубине массива. Сущность метода заключается в измерении радиальных смещений стенок скважины, пробуренной в напряженном участке массива, при его возмущении параллельной скважиной большого диаметра. Методика проведения измерений данным методом представлена на рисунке 1.3 [23].

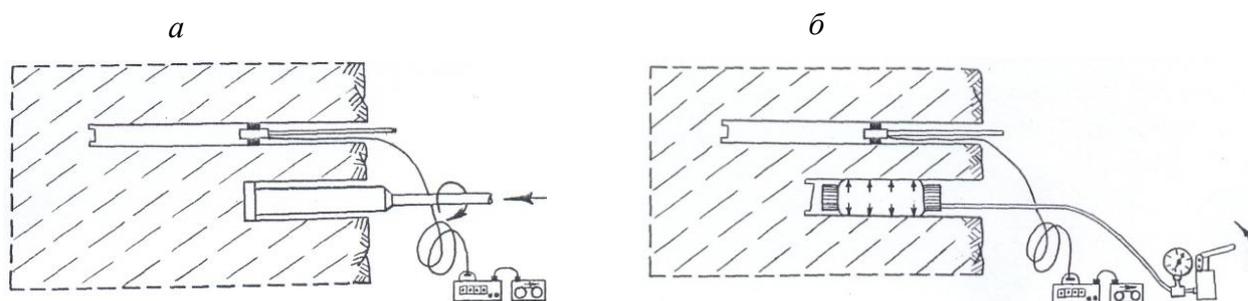


Рисунок 1.3 – Схема проведения эксперимента при определении напряженного состояния (а) и упругих констант среды (б)

Расчетная схема метода параллельных скважин основана на решении задачи теории упругости о НДС плоскости с двумя круговыми отверстиями, так как характер деформаций контура измерительной скважины не зависит от осевой компоненты напряжений. По результатам одного замера удастся определить компоненты напряжений, действующие в плоскости, нормальной к продольной оси скважины [23-25].

**Метод упругих включений** используется для оценки изменения напряженного состояния массива.

Указанный метод основан на применении фотоупругих датчиков (тензометров), обладающих свойством изменять степень прозрачности в поляризованном свете при

воздействии на них определенной нагрузки. При комплексном нагружении в таком датчике можно наблюдать сложную картину изохром и изоклин, обладающих двумя взаимно перпендикулярными осями симметрии, указывающими на направление главных нормальных напряжений. В случае, когда компоненты таких напряжений равны, в поляризованном свете на картине полос фотоупругого тензометра можно наблюдать ряд концентрических окружностей [4, 26-30].

Абсолютные напряжения в массиве определяются сложением первоначальных напряжений, измеренных одним из методов разгрузки, и приращенных напряжений, измеренных с помощью метода упругих включений. В данном случае комплексирование геомеханических методов является обязательным условием определения абсолютных значений действующих в массиве напряжений.

#### *Компенсационные методы*

К компенсационным методам относятся методы гидроразрыва, плоских домкратов, компенсационной нагрузки.

**Метод гидроразрыва** основан на принципе восстановления первоначальных напряжений в массиве горных пород и дальнейшего увеличения давления вплоть до образования в массиве трещин разрыва [31, 32].

Суть метода сводится к следующему. Из горной выработки в направлении действия одного из главных напряжений бурится измерительная скважина, в которой на определенной глубине устанавливаются два пакера. Через отверстие в одном из них в скважину с помощью насоса нагнетается жидкость. При достижении в замкнутом объеме участка скважины определенного значения давления жидкости, по площадке в массиве с наибольшим растягивающим тангенциальным напряжением инициируется трещина разрыва. Направление развития трещины в этом случае будет совпадать с направлением действия максимального сжимающего напряжения, находящегося в плоскости, ортогональной оси скважины [4].

**Метод плоских домкратов** был предложен в 1952 году в развитие метода щелевой разгрузки. Как и в методе щелевой разгрузки, на стенке выработки устанавливаются два съемных репера, и измеряется расстояние между ними. Затем с помощью

строчки шпуров или алмазной пилы создается щель, приводящая к деформации пород стенки выработки. Для оценки этой деформации снова измеряется расстояние между съемными реперами. На следующем этапе поверхность щели выравнивается с помощью цементно-песчаной смеси, и в щель вставляется плоский гидродомкрат, в котором наращивается давление до тех пор, пока деформация стенок выработки, вызванная образованием щели, не исчезнет (съемные репера не примут первоначальное положение). Величина нормального напряжения, действующего на стенке выработки и нормального плоскости щели, определяется как давление, создаваемое домкратом [8].

Метод менее чувствителен к локальным неоднородностям массива, чем щелевая разгрузка, так как их влияние на модуль деформации нивелируется самой технологией эксперимента. Обработка результатов измерений ведется на основе решения плоских задач теории упругости в однородной изотропной линейно-упругой среде. Для получения полного тензора первоначальных напряжений требуется проведение 6 независимых измерений с различной ориентировкой щелей. [8].

**Метод компенсационной нагрузки** заключается в первоначальном снятии и последующем искусственном восстановлении напряжений на изучаемом участке массива [5,8].

На стенке выработки (обнажения) с помощью реперов устанавливаются перпендикулярно друг другу два индикатора часового типа. Записываются начальные показания индикаторов. После этого снимаются напряжения (разгружается массив) путем создания полостей различных конфигураций (щелей, скважин и т.д.). В результате разгрузки части массива горных пород показания индикаторов часового типа изменяются. В разгрузочную щель устанавливаются специальные нагрузочные приспособления (дилатометры, домкраты, гидроподушки и т.п.). С помощью насоса в них закачивается водомаслянная эмульсия до тех пор, пока индикаторы не покажут первоначальное значение. Давление в системе фиксируется с помощью манометра. Давление, при котором индикаторы часового типа принимают первоначальные значения, принимаются за величину напряжения в массиве [5].

Метод компенсационной нагрузки позволяет непосредственно получить величину напряжения, нормального к плоскости обнажения [5].

Определение напряжений в массиве горных пород **методом буровых скважин** основано на измерении упругих деформаций (поперечных или продольных) контура скважины, вызванных дополнительными напряжениями от ведения очистных работ.

Различные по конструкциям поперечные и продольные деформометры позволяют фиксировать изменения диаметров скважин и продольные деформации по скважинам с помощью проволочных тензодатчиков сопротивления, индукционных, емкостных, магнитострикционных и других датчиков.

Сравнительная характеристика методов определения напряжений по [4-6, 7-29] представлена в таблице 1.2.

ТАБЛИЦА 1.2 – Сравнительная характеристика геомеханических методов определения напряжений [4-6, 7-29]

Метод определения напряжений	Объект, подлежащий исследованию	Величины, подлежащие измерению	Применяемые средства измерения	Способ перехода к напряжениям	Данные, необходимые для пересчета	Характеристика получаемых напряжений
Полная разгрузка. Схема ВНИМИ	Керн	Деформация разгрузки на торце скважины	Тензометрические или фотоупругие датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости и коэффициент Пуассона	Абсолютные величины и направления главных напряжений в массиве
Полная разгрузка. Схема Хаста	Керн центральной скважиной	Измерение диаметра скважины	Тензометрические, магнитострикционные, емкостные датчики	Пересчет на базе теории упругости, лабораторное эталонирование	Тарировочная кривая деформации датчика в напряжениях, модуль упругости, коэффициент Пуассона	Величины и направления напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси скважины
Полная разгрузка. Схема Лимана	Керн центральной скважиной	Деформация на поверхности скважины	Тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости и коэффициент Пуассона	Абсолютные величины и направления главных напряжений в массиве
Частичная разгрузка	Участок стенки выработки или ниши	Деформация участка стенки выработок	—	—	—	Величины и направления напряжений, действующих на поверхностях стенок выработки
Метод плоских домкратов	Стенки скважины	Давление, создаваемое в домкрате	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль Юнга, коэффициент Пуассона	Напряжения, действующие перпендикулярно плоскости щели

## Продолжение ТАБЛИЦЫ 1.2

Метод определения напряжений	Объект, подлежащий исследованию	Величины, подлежащие измерению	Применяемые средства измерения	Способ перехода к напряжениям	Данные, необходимые для пересчета	Характеристика получаемых напряжений
Компенсационная разгрузка	Участок массива	Деформация упругого восстановления участка массива. Давление в гидравлической системе	Тензометрические датчики и механические индикаторы манометры, электроманометры	Непосредственное получение величины напряжений	—	Величины напряжения, нормального к поверхности обнажения
Щелевая разгрузка	Стенки щели	Деформации стенок щели	Тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициенты концентрации напряжений приконтурной части щели	Напряжения, действующие перпендикулярно плоскости щели
Метод разности давлений	Стенки скважины	Давление в гидравлической системе	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости, эталонирование	связь давления в системе с напряжением в массиве путем эталонирования прибора	Средняя величина напряжения, нормального к поверхности скважины
Метод упругих динамометров	Стенки скважины	Нагрузка на упругий динамометр	Фотоупругие тензометрические динамометры	Пересчет или эталонирование	Модуль упругости, коэффициент Пуассона лабораторное	Относительное изменение напряжения, нормального к поверхности скважины

Продолжение ТАБЛИЦЫ 1.2

Метод определения напряжений	Объект, подлежащий исследованию	Величины, подлежащие измерению	Применяемые средства измерения	Способ перехода к напряжениям	Данные, необходимые для пересчета	Характеристика получаемых напряжений
Метод параллельных скважин	Стенки скважины	Измерение диаметра скважины	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости, коэффициент Пуассона	Величина напряжения, нормального к поверхности скважины
Измерение деформаций стенок буровых скважин	Стенки скважины	Измерение диаметра скважины	Тензометрические, струнные, индуктивные, емкостные деформометры	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости, коэффициент Пуассона	Величина напряжения, нормального к поверхности скважины

На основании представленного обзора можно сделать вывод, что наиболее точные результаты измерений НДС массивов горных пород и железобетонных крепей при оценке их механического состояния и остаточного ресурса эксплуатации обеспечивают геомеханические методы, связанные с бурением измерительных скважин. Однако при этом, на исследуемом участке крепи не осуществляется выбор наиболее пригодного для проходки скважин места, не оценивается наличие пустот и зон нарушенности массива вмещающих пород и зоны контакта «крепь – массив», что может привести к искажению результатов измерений или вовсе невозможности проведения таковых.

## 1.2. Геофизические методы определения напряжённого состояния породных массивов и их физико-механических свойств

### *Ультразвуковые методы определения напряжений в массиве горных пород*

Сущность получения информации о НДС горных пород ультразвуковыми (УЗ) методами сводится к следующему. В процессе своего распространения УЗ колебания (УЗК) взаимодействуют с первичными полями различной физической природы, характеризующими горную породу как объект исследований и контроля. В частности, это относится к полям напряжений. При этом изменяются параметры УЗ колебаний. В результате, последние становятся носителями геомеханической информации. В то же время сами УЗК, являясь низкоэнергетическими, на исследуемые первичные поля практически не влияют. Таким образом, проблема определения параметров первичных физических полей сводится к измерению параметров распространяющихся в массиве УЗ сигналов, осуществляемому современными радиоэлектронными средствами [33].

В качестве информативных параметров УЗ контроля чаще всего используются скорости распространения продольных  $C_p$  и (реже) поперечных  $C_s$  упругих волн, а также их коэффициенты затухания  $\alpha_p$  и  $\alpha_s$  соответственно. Частотный диапазон, используемый при измерениях в массиве, обычно составляет от 30 до 150 кГц [4].

При определении напряжений в приконтурном массиве горных пород в зависимости от реализуемой схемы измерений различают:

- 1) метод ультразвуковых проходящих волн;
- 2) метод ультразвукового каротажа;
- 3) метод отраженных волн.

Метод **ультразвуковых проходящих волн (прозвучивания)** занимает доминирующее положение среди УЗ методов геоконтроля. Это связано, с одной стороны, с наиболее совершенным их методическим и аппаратным обеспечением, а с другой – с возможно-

стью использования этих методов в широком диапазоне контролируемых баз (от нескольких сантиметров до нескольких метров) как на образцах, так и в массиве горных пород (вариант межскважинного прозвучивания) [4].

Одна из наиболее часто решаемых с использованием УЗ методов задач геоконтроля заключается в изучении характера пространственного распределения напряжений в окрестностях выработок и его динамики во времени [34].

Последовательность операций при реализации измерений методом прозвучивания следующая. Из горной выработки в массив бурят набор параллельных шпуров по треугольной или круговой схеме, как показано на рисунке 1.4.

Далее скважинные зонды размещаются в параллельных шпурах. Акустический преобразователь в одном из зондов используется в качестве излучателя импульсных УЗ колебаний, а во втором – в качестве приемника. Затем зонды перемещаются синхронно и дискретно вглубь массива. Измерение пространственного распределения информативных параметров УЗ контроля, чаще всего величины  $C_p$ , отражает пространственное распределение напряжений [4,35].

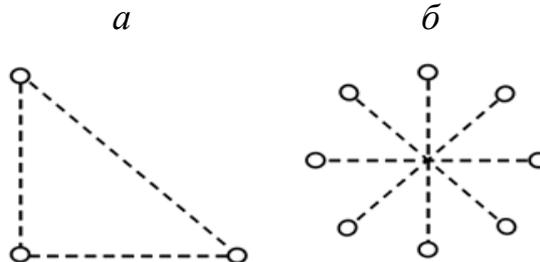


Рисунок 1.4 – Расположение шпуров: а – по треугольной схеме; б – по круговой схеме

**Ультразвуковой (УЗ) каротаж** представляет собой скважинный метод геофизических исследований, основанный на изучении акустических свойств горных пород, пересекаемых скважиной и непосредственно примыкающих к ней. Реализация этого метода предполагает использование одного скважинного зонда, в котором расположены излучатель и один или несколько приемников УЗ импульсных сигналов.

Такой зонд перемещается вдоль линейного профиля, расположенного на оси водонаполненной, либо образующей сухой скважины. По характеру распределения измеренных акустических характеристик вдоль профиля судят о характере распределения напряжений в

приконтурном массиве [4]. Интерпретация результатов каротажных измерений отличается некоторыми особенностями, которые отражены в [33].

**УЗ метод отраженных волн** предполагает излучение в контролируемую область массива и последующую регистрацию отраженного от естественной или искусственной неоднородности в нем УЗ сигнала. Метод имеет относительно ограниченное применение при изучении НДС геосреды, что можно объяснить значительными потерями мощности сигнала на удвоенной базе его распространения (от совмещенного акустического преобразователя до отражающей неоднородности и обратно), а также на границе между вмещающей геосредой и неоднородностью, поскольку коэффициент отражения от последней может быть значительно меньше единицы [4].

#### *Звукометрические методы*

**Звукометрический метод** основан на измерении активности акустических импульсов, возникающих при изменении напряженно-деформированного состояния в определенной области массива [36-38].

Экспериментальные исследования [4, 11] показали, что наибольшая интенсивность акустических сигналов соответствует промежутку давлений от 30 до 60% от разрушающих. При этом процесс изменения давления оказывает большее влияние на интенсивность акустических импульсов, чем абсолютное значение этого давления. Это создает предпосылки к использованию звукометрического метода для оценки динамики напряженно-деформированного состояния массива во времени [4, 11].

Натурным измерениям обычно предшествуют лабораторные испытания образцов горных пород, в процессе которых выявляется взаимосвязь между давлением на образец и активностью акустических импульсов.

#### *Гамма-метод оценки напряжённого состояния массива*

В основе данного метода лежит явление ослабления радиоактивного излучения с повышением плотности горных пород, которая в свою очередь является функцией

напряжений. В соответствии с проникающей способностью излучения для эффективной реализации метода подходит только гамма-излучение [4, 37-39].

Все гамма-методы определения напряжений в массиве горных пород можно подразделить на три основных типа:

- 1) метод узкого пучка;
- 2) метод широкого пучка;
- 3) метод рассеянного гамма-излучения.

В подземных условиях в основном применяется метод широкого пучка. При использовании этого метода регистрации подлежит как первичное, так и рассеянное излучение. В этом случае для регистрации гамма-излучения используются интегрирующие радиометры на газоразрядных счетчиках. Измерения производят в параллельных шпурах глубиной до 3 м [4, 40, 41].

*Методы, основанные на использовании эффектов памяти в горных породах  
и помещаемых в массив композиционных материалах*

Оценки вида напряженного состояния (направлений и величин главных напряжений, действующих в массиве) могут быть получены на базе использования **свойства памяти горных пород** – их способности запоминать, хранить и воспроизводить информацию об испытанных напряжениях. Конкретные проявления этого свойства получили название эффектов памяти. Одним из таких эффектов, наиболее перспективных для исследования напряжений, является акустико-эмиссионный эффект памяти [4, 42-48]. Он заключается в невоспроизводимости параметров акустической эмиссии (АЭ) в процессе нагружения при напряжениях, меньших максимально достигнутого ранее их значения.

В ряде случаев для более однозначной интерпретации результатов контроля напряжений на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти совместно с ним используется деформационный эффект памяти. В общем случае этот эффект заключается в ряде характерных изменений деформационных свойств и параметров деформирования пород при нагрузке, достигнувшей максимального значения, действовавшего в предшествующем цикле [4].

Большинство перечисленных выше методов в реальных условиях породных массивов дают лишь качественную оценку напряжений в исследуемом массиве и малопригодны для определения их абсолютных значений.

Достаточно полный обзор развитию методов горной геофизики и достижениям в области разработки скважинных геофизических методов электрометрии и радиометрии для контроля напряжённо-деформированного состояния массивов горных пород представлен в монографии [39].

**Акустические методы** определения свойств породных массивов основаны на анализе спектров излучаемых сигналов и зависимости этих спектров от свойств исследуемого массива, а также на изменении скорости упругих волн при переходе из среды с одними физико-механическими свойствами в среду с другими свойствами [46].

*Электрометрические методы определения напряжений и  
физико-механических свойств породных массивов*

Большинство горных пород, представленных диэлектриками, имеет электролитическую природу проводимости. Ток в этих породах проводят насыщающие их флюиды – растворы минеральных солей, щелочей и кислот. Таким образом, проводимость таких пород в значительной степени зависит от их трещиноватости и пористости, а также наполненности их различными флюидами.

Основной характеристикой, описывающей степень проводимости горных пород, является объемное удельное сопротивление, определяемое формулой [4]:

$$\rho_V = \frac{R_V S}{h}, \quad (1.1)$$

где  $R_V$  – объемное сопротивление образца, Ом;  $S$  – площадь электрода, м<sup>2</sup>;  $h$  – толщина образца, м.

Электрическое сопротивление зависит от минерального состава пород и варьируется в широких пределах. Так, для магнетитов, являющихся проводниками,

$\rho_V \approx 10^{-5}$  Ом·м, а для некоторых слюд, характеризующихся диэлектрическими свойствами,  $\rho_V \approx 1017$  Ом·м [11].

Для решения задач определения напряженного состояния массива важным является тот факт, что изменения величины удельного сопротивления с ростом давления в разных породах могут носить различный характер [4].

Все вышесказанное обуславливает необходимость предварять натурные измерения лабораторными испытаниями образцов горных пород, в ходе которых определяется зависимость влияния давления на изменение  $\rho_V$ .

Одна из наиболее полных классификаций электромагнитных методов геоконтроля породных массивов приведена на рисунке 1.5 в соответствии с [49].

Широкое распространение получили контактные методы. Основную часть **активных контактных методов** составляют методы, основанные на измерении эффективного (кажущегося) удельного электрического сопротивления на постоянном или переменном токе с частотой до 100 Гц в бесскважинном (зондирование, профилирование с поверхности выработки) и скважинном вариантах (просвечивание, каротаж). Значительно реже применяются поляризационные методы (вызванной поляризации, становления поля и пр.) [49].

**Пассивные контактные методы** основаны на измерении параметров (ток, потенциал, градиент потенциала) естественных стационарных геоэлектрических полей, обусловленных пространственной изменчивостью окислительно-восстановительных свойств шахтных вод, электрохимических параметров горных пород, или фильтрацией минерализованных растворов [49].



Рисунок 1.5 – Классификация геофизических методов геоконтроля

**Активные бесконтактные методы** характеризуются наличием в измерительной аппаратуре генераторного блока, обеспечивающего зондирование массива переменным электромагнитным полем с частотами в диапазоне  $10^4$ - $10^8$  Гц. **Индукционный метод** предусматривает измерение вторичного поля вихревых токов, наведенных в проводящем массиве. **Индуктивный метод** основан на измерении индуктивности антенного контура в проводящей среде, электроемкостной — на зависимости одного из параметров генератора (например, частоты) от диэлектрической проницаемости среды, высокочастотное зондирование - на отражении электромагнитной волны от границы геоэлектрической неоднородности [49].

**Пассивные бесконтактные методы** включают регистрацию параметров (амплитуды, частоты, мощности) естественного электромагнитного излучения в радио-, световом, рентгеновском и  $\gamma$  - диапазонах. Пассивный геомагнитный метод основан на измерении составляющих вектора напряженности естественного геомагнитного поля высокочувствительным магнитометром (например, на основе датчика Холла или феррозонда) [49].

Кроме того, натурные измерения по временному параметру подразделяются на периодические и непрерывные. В ходе измерений удельного сопротивления горных пород применяют **двух- и четырехэлектродные схемы** на постоянном или переменном токе.

**Двухэлектродные измерения**, требующие бурения параллельных шпуров, чаще всего используются для оценки деформаций целиков, зон наибольшей концентрации напряжений, а также для контроля напряженно-деформированного состояния особо опасных участков ведения горных работ [4].

В четырехэлектродной схеме измерений используются пара питающих электродов  $AB$  и пара измерительных электродов  $MN$ . При использовании такой схемы отпадает необходимость бурения измерительных шпуров, а глубинность измерений определяется расстоянием между питающими электродами  $AB$ . Схема четырехэлектродных измерений представлена на рисунке 1.6 [4].

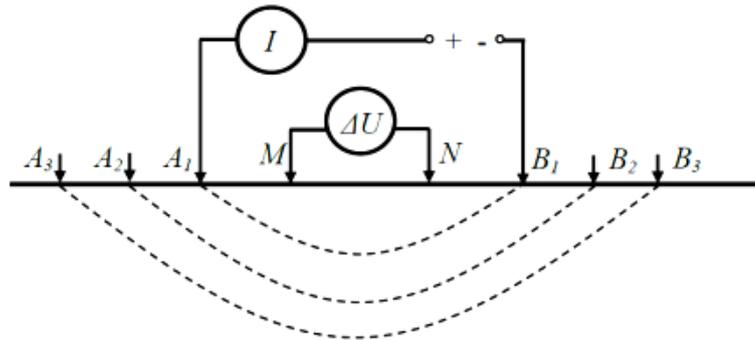


Рисунок 1.6 – Четырехэлектродное электрическое зондирование

При изучении распределения напряжений в массиве горных пород применяют метод подземного электрического зондирования (ПЭЗ) и метод электрического профилирования.

В методе ПЭЗ измерительные электроды  $MN$  оставляют неподвижными, а питающие электроды  $AB$  разносят, рассчитывая при этом кажущееся электрическое сопротивление по формуле:

$$\rho_k = k(\Delta U/I), \quad (1.2)$$

где  $\Delta U$  – разность потенциалов между измерительными электродами  $MN$ ;  $I$  – сила тока питающих электродов  $AB$ ;  $k$  – коэффициент установки, определяемый расстоянием между питающими и измерительными электродами.

По результатам измерений строят зависимости распределения рассчитанных значений  $\rho_k$  от расстояния между  $AB$ , характеризующие изменение  $\rho_V$  с глубиной.

Для определения динамики напряжённо-деформированного состояния массива необходимо производить многократные измерения [4].

Кроме контроля и определения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород геофизические методы позволяют проводить контроль его физико-механических свойств. К таковым методам относятся, в частности, радиоволновое профилирование, зондирование и просвечивание. Рассмотрим их более подробно.

#### *Методы контроля физико-механических свойств породного массива*

Существует несколько наиболее часто используемых методов радиоволновой диагностики физико-механических свойств породного массива: просвечивание (РП), профилирование (РВП), зондирование (РВЗ) [11]. Ниже представлен обзор принципов их работы.

**Высокочастотные электромагнитные методы** достаточно разнообразны по сферам практических приложений. Относительно большое количество радиоволновых методов объясняется как различием задач, решаемых с помощью данных методов, так и большими их возможностями, обусловленными волновой природой. Исходя из этих двух особенностей, волновые методы классифицируются на основании различных подходов к задачам и средствам их решения.

Основная классификация высокочастотных электромагнитных методов основана на методических особенностях их применения [11].

**Радиоволновое просвечивание** основано на изучении электрофизических свойств массива горных пород между источником и приемником электромагнитных волн: в пространстве между горными выработками, между двумя или более сква-

жинами, между выработкой и скважиной, между земной поверхностью и скважиной или подземной выработкой [11, 39].

**Методы радиоволнового профилирования** включают в себя так называемый радиокомпарационный метод (метод радиокип), при котором в качестве источника электромагнитных волн используются ширококвещательные длинноволновые станции или специальные сверхдлинноволновые радиостанции морской навигации и связи. Частотный диапазон таких станций соответствует значениям 120-450 кГц (длинноволновые) и 10-25 кГц (сверхдлинноволновые). Измеряются, как правило, различные составляющие напряженности магнитного поля с использованием рамочных антенн ( $H_\varphi$ ,  $H_z$ ,  $H_\nu$ ,  $\alpha$ ), а также электрические составляющие ( $E_\mu$ ,  $E_x$  и  $E_y$ ) с помощью изолированных или заземленных на концах электрических линий длиной до 20 м. Шаг профилирования при наземных наблюдениях изменяется от 5 до 50 м, при подземных исследованиях в среднем составляет 10 м [11].

При применении радиокомпарационной съемки выделяются контакты пород, зоны тектонических нарушений, зоны высокоомных тел (кварцевых жил), наличие рудных и нерудных полезных ископаемых. Глубинность метода в пределах от 10 до 100 м в районах со спокойным рельефом и маломощными покровными отложениями [11,46].

**Радиоволновое зондирование**, применяемое в высокочастотных электромагнитных методах (от 1 – 20 МГц и выше), используется для изучения слоистого разреза массива пород на глубинах от нескольких метров до нескольких десятков метров. В методах РВЗ источник и приемник электромагнитного поля располагаются на одной поверхности. При наличии отражающей поверхности приемник будет регистрировать две группы волн: прямую (поверхностную) волну, распространяющуюся вдоль поверхности наблюдения, и отраженную от границы раздела волну. Данные волны интерферируют друг с другом и образуют общий сигнал, регистрируемый приемной антенной [11].

Основным информационным параметром при проведении измерений в данном методе является время распространения отраженной от границы раздела сред электромагнитной волны. Определяя время распространения отраженной волны и фик-

сируя изменение данного времени при передвижении приемно-передающих антенн вдоль профиля, можно определить расстояние до отражающей поверхности, а также получить информацию о форме локальной аномалии. При этом точность данных методов будет в значительной мере определяться знанием скорости распространения электромагнитных волн во вмещающей среде в пределах измерительного профиля [11, 50, 51].

Как следует из выполненного в п. 1.1 и 1.2 обзора, многие методы контроля НДС породного массива и его свойств требуют проходки скважин для размещения в них измерительного оборудования. Качество бурения таких скважин нередко связано с наличием в геосреде различного рода естественных и искусственных включений, способных оказывать влияние как на траекторию движения бурового снаряда, так и на принципиальную возможность проведения экспериментальных исследований. Кроме того, попадание ствола скважины в места локализации механических неоднородностей и зон нарушения сплошности часто становятся причиной выхода из строя дорогостоящего измерительного оборудования. В связи с этим, информация о структурной неоднородности массива, его геомеханических свойствах и способность оценивать характер выявляемых включений, позволяет осуществлять обоснованный выбор мест, пригодных для проведения буровых работ разного назначения.

На основе отмеченного выше, можно сделать вывод, что для решения задач обнаружения механических неоднородностей в породных массивах более всего подходят методы ультразвукового каротажа, ультразвуковой метод отраженных волн, высокочастотные электромагнитные методы просвечивания, зондирования и профилирования. В свою очередь, отмеченные акустические методы не обеспечивают необходимую разрешающую способность и дальность обнаружения неоднородностей и требуют высоких трудозатрат при реализации, а методы радиоволнового профилирования и просвечивания отличаются высокой трудоемкостью и низкой точностью обнаружения слабоконтрастных и мелкоразмерных неоднородностей. Методы радиоволнового зондирования позволяют снизить указанные недостатки акустических методов, а также методов РВ профилирования и РВ просвечивания.

В связи с ярко выраженными особенностями физической реализации, методы радиоволнового зондирования выделяются в отдельную классификационную группу. Детальное рассмотрение указанных методов приведено в п. 1.3.

В зависимости от условий решаемой задачи измерение НДС и определение механических свойств геоматериалов приходится проводить на разных дальностях от поверхности обнажения (от нескольких десятков сантиметров до десятков метров). Соответственно, на такие же расстояния требуется бурить измерительные скважины. При увеличении их длины повышается вероятность искривления ствола скважины, что является нежелательным. Поэтому оперативный контроль процесса проходки измерительных скважин геомеханического контроля также представляет собой актуальную научную задачу.

Одним из наиболее эффективных и широко распространенных методов бурения является ударно-вращательный. Разработано и реализовано множество конструкций для погружаемых пневмоударников [52-57], в разы повышающих эффективность буровых работ. В большинстве применяемых отечественной промышленностью буровых станках отсутствует механизм определения положения пневмоударника в массиве, а также средство контроля за направлением его движения. Это приводит к тому, что эффективность буровых работ значительно снижается из-за необходимости повторного бурения скважин при попадании в зоны нарушения массива или в пустоты, приводящих к отклонению скважины от требуемой траектории.

Существующие в настоящее время и широко используемые в установках горизонтального направленного бурения для решения задачи контроля местоположения бурового снаряда в породном массиве электромагнитные системы [58-64] (MagСтир, Англия; SNS-100, SNS-200, г. Ульяновск, Россия; Mark V, Eclipse, Германия) основаны на размещении излучающего зонда в рабочем органе самой машины, а с помощью приемного устройства на поверхности Земли оператор получает информацию о ее координатах. Несмотря на сравнительно высокую точность таких систем, они обладают рядом ограничений: требуют конструктивного изменения отечественных пневмопробойников, подвержены воздействию низкочастотных электромагнитных помех и чувствительны к ударным нагрузкам и температурному режиму.

Применение акустических методов позволяют контролировать положение рабочих органов буровых машин без вмешательства в конструкцию самой машины, но на сегодняшний день им уделяется пока недостаточное внимание. Данные методы основаны на определении координат рабочего органа буровой машины ударного действия по акустическому сигналу, создаваемому самим рабочим органом на поверхности обнажения [65-71]. В связи с этим, в п. 1.4 представлено подробное описание акустического метода определения координат источника ударно воздействия на массив горных пород.

### **1.3. Георадиолокационный метод и аппаратура для проведения экспериментов.**

#### **Области применения в горном деле**

В настоящее время достаточно широкое применение и развитие в науках о Земле получает высокочастотная модификация радиолокационного метода, основанная на использовании георадаров (георадиолокационных устройств) со сравнительно небольшой мощностью передающих антенн и рабочими частотами от десятков до нескольких тысяч мегагерц. Так, например, георадары обеспечивают необходимую для решения инженерных задач разрешающую способность и могут применяться для обнаружения искомых объектов на дальностях до сотни метров [50, 51, 72, 73].

Существует две основные разновидности георадиолокационного метода: импульсный метод радиолокации (ИМР) и интерференционный радиолокационный метод с использованием частотной модуляции зондирующего сигнала.

Наибольшее распространение в настоящее время получил импульсный метод радиолокации, заключающийся в возбуждении передающей антенной в исследуемом объекте очень коротких электромагнитных импульсов со значительной амплитудой, в приеме отраженных от границы раздела импульсов и в определении времени распространения отраженного импульса от отражающей поверхности до приемной антенны [50].

Частотный диапазон заполнения радиолокационного зондирующего импульса достаточно высокий и составляет от 15 МГц до 3000 МГц – в зависимости от условий решаемой технической задачи и от особенностей используемой при этом радиолокационной аппаратуры. Так, при проведении исследований на достаточно больших расстояниях до отражающих поверхностей (в пределах нескольких сотен метров) оптимальные частоты составляют от 30 до 500 МГц [11, 50].

Работа георадиолокационного прибора – георадара – схематично представлена на рисунке 1.7 [50, 51].



Рисунок 1.7 – К описанию принципа работы георадара:  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  – диэлектрические проницаемости среды распространения электромагнитной волны и «цели» соответственно

Таковыми границами могут являться как геологические объекты, так и локальные неоднородности природного или техногенного происхождения. Это дает возможность использовать георадар для выявления подповерхностных структурно-вещественных неоднородностей, в том числе неметаллических, находящихся в различных средах.

При помощи георадара можно исследовать любые непроводящие среды – грунт, воду, воздушные полости, строительные конструкции – армированные и не армированные, конструктивные слои дорожной одежды и многое другое. В результате получается непрерывный во времени разрез зондируемой среды, называемый георадиолокационным профилем, или радарограммой [50].

Процесс георадарного обследования участка породного массива представлен на рисунке 1.8 [51].

Так как большинство грунтов и скальных пород обладают дисперсией скоростей распространения электромагнитных волн и коэффициентами их поглощения, быстро растущими с увеличением частоты зондирующего электромагнитного сигнала, то для достижения требуемой разрешающей способности по дальности и оценке координат неоднородностей используются максимально широкополосные сигналы, которые представляют собой сверхкороткие электромагнитные импульсы (длительностью в единицы и доли наносекунды), имеющие 1,0-1,5 периода квазигармонического сигнала [72, 74].

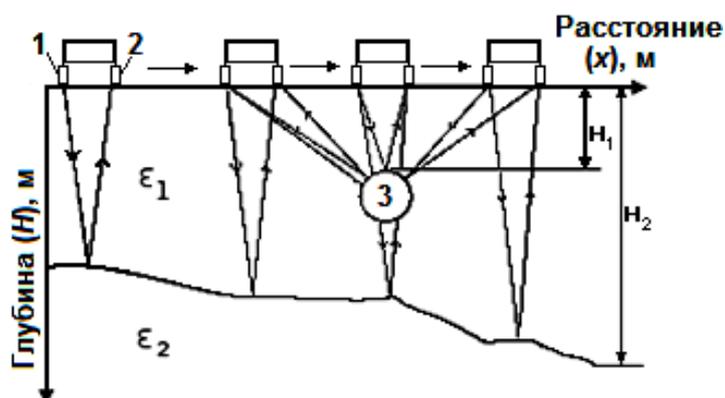


Рисунок 1.8 – Схема образования отраженного от трубы 3, залегающей на глубине  $H_1$ , и от границы раздела сред (переменной глубины  $H_2$ ) с разными диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  (глубинный разрез) зондирующего электромагнитного сигнала: 1, 2 – передающая и приемная антенны георадара

Средняя (центральная) частота излучаемого спектра электромагнитных волн определяется параметрами и габаритами антенны. Для формирования зондирующих импульсов используется набор сменных антенных блоков с различными центральными частотами, применение которых обеспечивает разную глубину исследований и разрешающую способность. Генерация зондирующих сигналов осуществляется ударным методом возбуждения путем перепада напряжения [50, 51, 72, 74].

Далее подробно рассмотрим соотношения, описывающие зондирующие сигналы георадара. Их аналитическое описание определяется выражением [75]:

$$S_{\text{изл}}(t) = e^{-\frac{\pi(t-kT)^2}{\tau^2}} \cdot e^{i\omega(t-kT)}, \quad (1.3)$$

где  $T$  – период колебаний,  $\tau$  – постоянная времени, определяемая выходными параметрами генератора,  $\omega$  – круговая частота генератора,  $k$  – волновое число (для воздушной среды  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ).

Форма такого сигнала для импульса длительностью 1 нс представлена на рисунке 1.9.

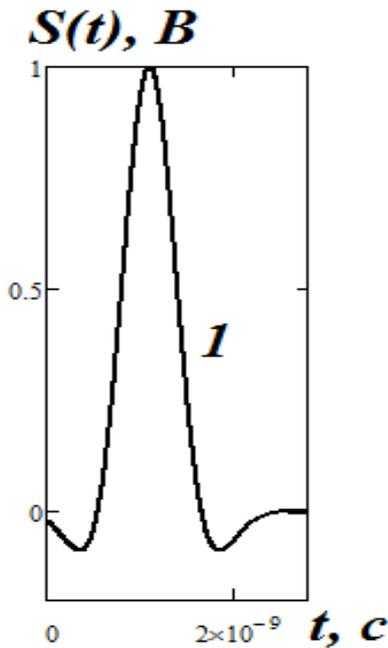


Рисунок 1.9 – Форма зондирующего электромагнитного сигнала георадара

Форма отраженного сигнала зависит не только от электрофизических свойств породного массива, но и от наличия в нем достаточной выраженности (контрастности) границ между двумя слоями [73, 76].

Однако достоверность и точность результатов георадиолокационного обследования во многом зависит от качества последующей обработки и правильности интерпретации экспериментальных данных (радарограмм), что, в свою очередь, требует достаточно высокой квалификации и опыта оператора [51, 72]. Так, часто на радарограмме фиксируются реверберации и помехи от находящихся в среде распространения зондирующего сигнала механических неоднородностей, которые усложняют процесс интерпретации результатов измерений.

В глинистых грунтах радиоволны довольно быстро затухают. Кроме того, по данным георадиолокационного обследования нередко сложно определить физико-механические свойства геосред [51].

### *Области применения георадаров*

Все задачи, решаемые с помощью георадара, могут быть разделены на две большие группы с характерными для каждой группы методиками исследований, способами обработки, типами отображения объектов исследования в поле электромагнитных волн и представлениями результата: геологические задачи и задачи обследования инженерных сооружений [51, 77].

*Геологические, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи [51,77]:*

- а) картирование геологических структур – восстановление геометрии относительно протяженных границ, поверхности коренных пород под рыхлыми осадочными, уровня грунтовых вод, границ между слоями с различной степенью водонасыщения, поиск месторождений строительных материалов;
- б) определение свойств различных отложений по скорости распространения электромагнитных волн, опираясь на связь этих свойств с диэлектрической проницаемостью пород;
- в) определение толщины ледяного покрова;
- г) определение мощности водного слоя и картирование поддонных отложений;
- д) определение мощности зоны сезонного промерзания, оконтуривание областей вечной мерзлоты, таликов.

*Поиск локальных объектов, обследование инженерных сооружений, нарушения штатной ситуации:*

- а) трубопроводов;
- б) кабелей;
- в) участков разреза с нарушенным естественным залеганием грунта – рекультивированных земель, засыпанных выемок;
- г) погребенных отходов и захоронений;
- д) подземных выработок, подвалов, карстовых и суффозионных провалов;
- е) границ распространения углеводородных загрязнений;
- ж) поиск скрытых нарушений в стенах наземных сооружений, шахт, тоннелей, в опорах и перекрытиях;
- з) поиск нарушений, возникших в процессе строительства или в процессе эксплуатации в конструкции автомобильных и железных дорог, взлетно-посадочных полос аэродромов и т.д.

В таблице 1.3 представлены параметры наиболее широко используемых георадаров отечественного производства [78, 79].

ТАБЛИЦА 1.3 – Сравнение современных отечественных георадаров

Основные параметры современных радаров										
Параметр	«Око»							«Герад»		
Тип антенн	АБД	АБ-150	АБ-250	АБ-400	АБ-700	АБ-1200	АБ-1700	А-20	А-600	А-2000
Максимальная глубина зондирования, м	30	12	8	5	3	1,5	1	10	4	1
Разрешающая способность, м	0,5—2,0	0,35	0,25	0,15	0,1	0,05	0,03	0,2	0,1	0,02
Габаритные размеры антенны, мм	–	1580/ 620/ 160	1040/ 430/ 110	680/ 275/ 120	470/ 160/ 170	400/ 160/ 180	205/ 165/ 135	400/420/90		
Масса антенны, кг	6,0	22,0	14,0	8,0	2,0	2,4	1,5	4	0,85	0,45
Частота, МГц	25—100	150	250	400	700	1200	1700	0,125		
Скорость движения, км/ч	20—30							10		
Диапазон рабочих температур, °С	–30...+50							–20...+65		
Питание	Встроенный никель-металл-гидридный аккумулятор или внешний источник питания							12 В; 0,7А		
Подключение	К КПК, ноутбуку, КПК по интерфейсу RS-485. Возможно подключение по радиомодему на расстоянии до 100 м							ПК с минимальными системными требованиями Pentium 100 МГц 8 Мб ОЗУ		

Иностранные фирмы также занимаются разработкой и производством георадаров. Так, американской компанией Geological Survey Systems Incorporated (GSSI) с 1971 года производятся георадиолокаторы [80]. Наиболее совершенной разработкой этой фирмы является георадар SIR-3000 с комплектом сменных антенных блоков, с помощью которого были выполнены экспериментальные исследования в рамках решения первой и второй задач диссертационной работы. Технические характеристики георадара SIR-3000 представлены в приложении А.

#### 1.4. Акустический метод определения координат источника ударного воздействия на породный массив

При решении задач определения местоположения источника техногенного воздействия на породный массив (сейсмособытие, горный удар и т.п.) широко используют системы геомеханического мониторинга, работа которых основана на вычис-

лении времен прохождения в породном массиве акустического сигнала от источника до приемника при известной скорости распространения упругих волн в данной геосреде [81]. Современные системы контроля строятся, как правило, многоканальными. Данные системы имеют взаимозависимые и независимые каналы приема с пространственно разнесенными или локально установленными приемными преобразователями, число которых меняется от 4 (минимально допустимое для решения триангуляционной пространственной задачи локации) до 24 и более.

На рисунке 1.10 изображены сигналы от одного источника акустического сигнала для случая четырехканального приема. Эти сигналы называют локационной серией, которая позволяет рассчитать координаты источника излучения [75].

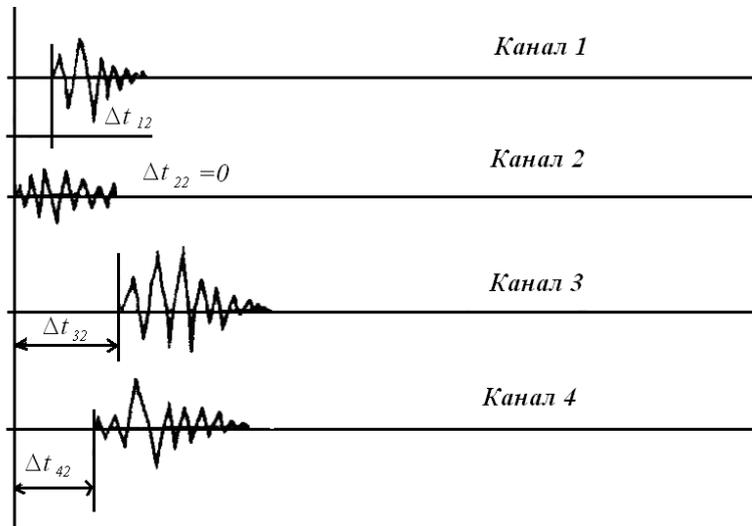


Рисунок 1.10 – Сигналы на выходе приемных преобразователей на примере четырехканальной системы регистрации

Координаты приемников акустических сигналов считаются известными – для  $i$ -го датчика это  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  (рисунок 1.11). Координаты источника  $x$ ,  $y$ ,  $z$  считаются неизвестными и их нужно определить. Время прихода сигнала на  $i$ -тый приемник определяется по формуле [81]:  $t_i = \frac{1}{V} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ , где  $V$  – скорость распространения упругой волны в геосреде.

Полагая, что первым приходит сигнал на датчик с номером  $k$ , можно определить разности времен прихода регистрируемых сигналов между приемными каналами (известные величины – рисунок 4.2). Временная разность между приходом акустических сигналов на  $k$ -й и  $i$ -й датчики определялась из следующих соотношений:

$$\Delta t_{kk} = 0,$$

$$\Delta t_{ki} = \frac{1}{V} [\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2} - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}]. \quad (1.4)$$

Для случая регистрации акустического сигнала  $n$  приемниками будем иметь  $n-1$  уравнение. Если решается задача на плоскости, то теоретически минимальное количество уравнений равно  $n_{min} = 3$ ; для пространственной задачи  $n_{min} = 4$ . Координаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  находятся известными методами решения соответствующих систем уравнений [81].

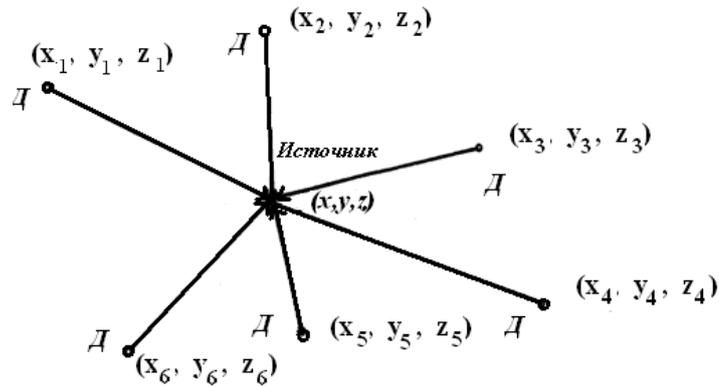


Рисунок 1.11 – Схема к определению координат источника акустического сигнала в породном массиве в объемном случае, где Д – приемные преобразователи

На практике обычно требуется большее, по сравнению с теоретически минимальным, количество уравнений. Это вызвано погрешностями измерений скоростей распространения упругих волн в геосреде –  $V$ . Например, в анизотропном породном массиве эти скорости различны в разных направлениях распространения акустических сигналов и могут меняться во времени, кроме того имеются технические погрешности измерений  $\Delta t_{ik}$ . Точность регистрации момента прихода сигнала из-за затухания упругих волн и порога чувствительности приборов зависит также от расстояния между приемными датчиками и удалениями их от источника акустического сигнала. На практике акустические датчики удается весьма широко расставить по координатам  $x$ ,  $y$  в горизонтальной плоскости, и в меньших пределах по глубине (координата  $z$ ). Этим обусловлена погрешность измерения координат источника излучения, которая для систем регионального контроля, например, составляет  $\pm 30 \dots 50$  м по координатам  $x$ ,  $y$ , и более 100 м по координате  $z$ . Большую погреш-

ность вносят также механические неоднородности породного массива, а также наличие зон повышенного горного давления. Это вызывает изменение геометрии пути распространения упругих колебаний [81].

В настоящее время существует большое разнообразие типов измерительной аппаратуры и систем контроля геомеханических процессов, отличающихся принципами построения, назначением, техническими характеристиками. Однако все они, как правило, состоят из одинаковых или похожих «элементарных» составных частей, узлов и блоков. Это является следствием того, что различные типы таких систем контроля и измерительной аппаратуры имеют схожую обобщенную схему.

Обобщенная схема аппаратуры контроля геомеханических процессов представлена на рисунке 1.12 [81].

Состояние объекта контроля (массива горных пород) характеризуется определенными параметрами, которые можно измерить и по их значениям определить напряжения, вероятность разрушения пород и другие характеристики механического состояния породного массива. В качестве таких параметров могут быть, например, деформации, скорость распространения упругих колебаний, активность акустической эмиссии, электрическое сопротивление и т.д. В одних случаях регистрируется только одно какое-либо явление (контроль одного параметра), в других случаях одновременно регистрируются несколько физических полей (многокомпонентный контроль). Эти физические параметры первичными преобразователями преобразуются в электрический сигнал, удобный для дальнейших операций и обработки в последующих блоках. Это такие операции, как усиление, частотная фильтрация, селекция сигналов от помех, модуляция, демодуляция и другие.



Рисунок 1.12 – Типовая структурная схема для инструментального контроля геомеханических процессов в породном массиве [81]

Информация, содержащаяся в зарегистрированных сигналах, должна быть передана на определенные расстояния. Такая передача осуществляется по металлическим проводникам, высокочастотному кабелю или волоконно-оптической линии связи. Применяются также беспроводные линии передачи экспериментальных данных – открытый оптический и радиоканалы. В блоках передачи информации осуществляется модуляция, демодуляция, фильтрация, преобразование спектра частот и другие процессы. Блоки обработки и хранения данных измерений осуществляют накопление их значений, преобразование (например, вычисление скорости и ускорения деформаций по известным отсчетам величин относительных смещений датчиков). В последнее время для этой цели успешно используются ЭВМ, микропроцессоры или однокристальные микро-ЭВМ [81].

Применяемые на практике системы мониторинга геомеханического состояния породного массива, работа которых основана на измерении времен распространения акустических сигналов в породном массиве, и их основные параметры представлены в [81, 82].

### 1.5. Цель работы и задачи исследований

На основании выполненного анализа существующих методов диагностики и контроля напряжённо-деформированного состояния и механических свойств массивов горных пород, можно сделать следующие выводы:

1. Для геомеханического мониторинга массивов горных пород и контроля НДС наземных и подземных сооружений широкое применение и развитие получили две группы методов: *геомеханические* (основанные на механической связи между напряжениями и деформациями горных пород) и *горно-геофизические* (основанные на эмпирической связи между напряжениями и значениями измеряемых геофизических параметров).

2. Для диагностики и контроля НДС массивов горных пород «абсолютными» геомеханическими методами наиболее широко применяются модификации, основанные на бурении скважин. В равной мере это относится и к наиболее употребительным в геомеханическом мониторинге горно-геофизическими каротажными методами (УЗК, электрометрия, плотностной ГГК).

3. Точность измерения контролируемых «абсолютными» геомеханическими и «качественными» горно-геофизическими методами физических и механических параметров геосреды определяется степенью соответствия основных положений теорий интерпретации геомеханико-геофизических данных («априорные» модели) реальным физико-механическим свойствам подсекаемых измерительными скважинами породных массивов (например, по критериям однородности, изотропии, линейной упругости).

4. Для решения задач обнаружения механических неоднородностей в породных массивах наиболее часто применяются методы ультразвукового каротажа, ультразвуковой метод отраженных волн, высокочастотные электромагнитные методы просвечивания, зондирования и профилирования. Применение методов радиоволнового зондирования позволяет исключить недостатки отмеченных акустических методов, а также методов РВ профилирования и РВ просвечивания (невысокая разрешающая способность, малая дальность действия и низкая точностью обнаружения слабоконтрастных и мелкогазмерных неоднородностей, высокая трудоемкость).

5. В современной научно-технической литературе не представлены систематические методологические и методические разработки, посвященные целенаправленным исследованиям в области навигационного геомеханического картирования

вдоль горных выработок (в том числе, с элементами крепления) для обоснованного выбора мест бурения измерительных скважин при осуществлении диагностики и контроля напряжённо-деформированного состояния и механических свойств применяемых железобетонных крепей и окрестных массивов горных пород.

6. При бурении скважин для целей геомеханического мониторинга перспективным представляется направление исследований, связанное с оперативным получением информации о НДС подсекемых геосред на основе механического взаимодействия породоразрушающих инструментов с горными породами.

7. Решение отмеченных в п.п. 5-6 задач геомеханического мониторинга представляется возможным на базе соответствующего развития комплексного подхода с использованием сверхвысокочастотного радиоволнового и акустического методов.

При проходке наклонно-горизонтальных скважин в грунтовых массивах буровыми машинами ударного действия возникают аналогичные проблемы, приводящие к изменению траектории движения машины из-за ее столкновений, например, с твердыми породными включениями, строительными отходами, уже проложенными коммуникациями и трубопроводами.

На основании сказанного выше предлагается ряд решений, позволяющих минимизировать возможности попадания в створ измерительных скважин механических неоднородностей породных массивов и элементов крепления, а также контролировать процесс проходки горизонтальных скважин в грунтовых массивах буровыми машинами ударного действия. Эти решения основаны на разработке комплексного геофизического метода для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения, состоящего из двух этапов:

1. контроль сплошности и однородности вмещающей геосреды радиолокационным методом, интерпретация данных и построение профиля геосреды с целью определения участков, пригодных для бурения измерительных скважин;

2. контроль процесса проходки скважины буровой машиной ударного действия путем определения пространственных координат ее рабочего органа в режиме реального времени на основе вычисления времен задержки поступления акустиче-

ского импульсного сигнала в приемники средства измерения относительно момента регистрации сигнала непосредственно с самой машины.

В связи с этим **цель диссертационной работы** заключается в следующем: разработка комплексного геофизического метода для выбора места расположения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения в геосредах, позволяющего исключить попадание породоразрушающего инструмента буровой машины ударного действия в закрепные пустоты приконтурного массива и в места локализации арматуры в железобетонной крепи подземных выработок, а также определять его пространственные координаты.

**Идея работы** заключается в использовании электромагнитных волн сверхвысокочастотного (до 3 ГГц) диапазона для выявления искусственных и естественных механических неоднородностей по электрофизическим свойствам геосреды, а акустических волн – для определения направления бурения скважины, сооружаемой породоразрушающими машинами ударного действия.

#### **Задачи исследований:**

1. Исследовать влияние нарушенности и влажности закрепного пространства на глубинность георадиолокационного обследования зоны контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» методом физического моделирования;
2. Разработать и обосновать методику обследования участка железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом для выбора места заложения измерительных скважин геомеханического контроля;
3. Разработать и исследовать экспериментальный образец многоканальной акустической измерительной системы определения местоположения рабочего органа буровой машины ударного действия для контроля процесса и направления бурения горизонтальных скважин в грунтовом массиве в режиме реального времени.

Для решения поставленных задач использовались следующие методы исследований: анализ научных и научно-технических источников, теоретические расчеты, экспериментальные исследования динамико-кинематических характеристик высокочастотных электромагнитных и акустических сигналов в геосредах, современные способы обработки экспериментальных данных.

## **ГЛАВА 2. ГЛУБИННОСТЬ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО МЕТОДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК С ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КРЕПЬЮ**

При длительной эксплуатации капитальных горных выработок с железобетонной крепью часто требуется оценка их остаточного ресурса эксплуатации, определение механического состояния системы крепления и массива вмещающих пород. Решить обозначенную проблему можно применением ряда мер, в который, как правило, входят измерения НДС и определение прочностных свойств бетона крепи и массива вмещающих пород, а также учет реологических свойств исследуемых геоматериалов.

Как было отмечено в первой главе, наиболее широкое распространение при оценке НДС получили скважинные геомеханические методы, обеспечивающие наибольшую точность измерений. Однако, получение важной информации о состоянии массива вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив», как правило, связано со значительным объемом буровых работ и невысокой достоверностью результатов. Акустические методы геофизических исследований позволяют решать данную задачу более успешно, однако обладают рядом недостатков, таких как сложность применяемой аппаратуры и развертывания средств измерений, недостаточно высокая точность. Применение метода сверхвысокочастотной георадиолокации, обладающего высокой разрешающей способностью, простотой выполнения исследований и удобной реализацией аппаратуры, позволяет устранить недостатки геомеханических и акустических геофизических методов контроля.

Однако важным является вопрос глубинности или максимальной дальности действия георадиолокационного метода. Данный параметр зависит от многих факторов, в частности, от электрофизических параметров геосред (таких как диэлек-

трическая проницаемость, проводимость, удельное сопротивление и т.д.), а также от рабочей частоты приемо-передающей системы, поскольку, как правило, сверхвысокочастотные электромагнитные волны обладают дисперсией фазовых скоростей распространения в геосредах [50, 51]. Более подробно обзор электрических параметров геосред, их классификация и частотная зависимость представлены в п. 2.1.

По существу, основной задачей, решаемой в данной главе, является оценка дальности действия метода сверхвысокочастотной (до 3 ГГц) георадиолокации для обнаружения и локализации металлической арматуры и других механических неоднородностей в железобетонной крепи подземных горных выработок на основе теоретических расчетов, а также исследование влияния нарушенности и влажности массива вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив» на глубинность георадиолокационного метода.

## **2.1. Электрические параметры геосред, их классификация и частотная зависимость**

Как известно [83, 84], распространение электромагнитных волн в среде описывается уравнением:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\varepsilon'}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

где  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля (В/м);  $\varepsilon'$  – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости (безразмерная);  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве –  $3 \cdot 10^8$  м/с;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость свободного пространства (Гн/м);  $\sigma$  – проводимость (См/м).

Электрофизические свойства (диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ , проводимость  $\sigma$ ) породного массива зависят от ряда факторов (температуры, влажности, частотно-

го диапазона, состава горной породы и т.д.). Магнитная проницаемость большинства грунтов равна магнитной проницаемости воздуха [50].

*Диэлектрическая проницаемость* показывает во сколько раз сила взаимодействия зарядов в среде меньше, чем в вакууме и играет существенную роль при распространении высокочастотных электромагнитных волн. В общем случае диэлектрическая проницаемость геосреды – комплексная величина [50]:

$$\varepsilon = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon' - j\sigma / \omega\varepsilon_0 = \varepsilon'(1 - jtg\delta), \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная:  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot \pi} \cdot 10^{-9}$ ;  $\varepsilon'$  – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости, характеризующая через комплексный показатель преломления скорость распространения волн в среде;  $\varepsilon''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости среды, определяющая токи проводимости и поглощение электромагнитных волн в среде.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла диэлектрических потерь, который определяется как отношение мнимой и действительной составляющих комплексной диэлектрической проницаемости [50]:

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon'}. \quad (2.3)$$

Комплексный характер относительной диэлектрической проницаемости отражает инерционность процессов, обусловленных поляризацией. Зависимость этой величины от частоты поля именуется ее дисперсией. В целом характер изменения  $\varepsilon'(\omega)$  и  $\varepsilon''(\omega)$  подчиняется формулам Дебая [85]:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{CT} - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (2.4)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_{CT} - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (2.5)$$

где  $\varepsilon_{CT}$  – статическое значение при  $\omega \ll \omega_0$ ,  $\omega_0$  – критическое значение частоты электромагнитного поля, до которой среда успевает реагировать на приложенное поле, а  $\varepsilon_\infty$  – высокочастотное значение при  $\omega \gg \omega_0$ ,  $\tau = 10^{-2} - 10^{-10}$  с – время установления релаксационной поляризации диэлектрика, именуемое временем релаксации.

Релаксационная поляризация характерна для диэлектриков, содержащих слабо связанные частицы, способные менять свое положение при тепловом движении. В разных диапазонах частот проявляются различные типы поляризации. При низких частотах имеет место максимальное значение  $\varepsilon'$ , а на радиочастотах – минимальное.

Отношение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости к мнимой называют добротностью среды [74, 84]:

$$Q = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''}. \quad (2.6)$$

Добротность среды – величина обратная тангенсу угла диэлектрических потерь (2.4).

*Удельное электрическое сопротивление и проводимость.* Удельное электрическое сопротивление –  $\rho$  (далее УЭС), измеряемое в омметрах (Ом·м), характеризует способность пород оказывать электрическое сопротивление прохождению тока и является наиболее универсальным электромагнитным свойством. Оно меняется в очень широких пределах: от менее  $10^{-3}$  до  $10^{15}$  Ом·м. Величина обратная УЭС называется проводимостью и измеряется в сименсах на метр (См/м),  $\sigma_n = 1/\rho$  [74, 84].

Анализ электрических свойств различных геосред в диапазоне частот  $10^6$ - $10^{10}$  Гц показывает, что можно выделить четыре группы (модели) сред [50, 72, 73].

Модель 1 характеризует среды со значительным затуханием  $\Gamma$ , сильно увеличивающимся, и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon'$ , заметно уменьшающейся с ростом частоты. Это соответствует суглинкам и глинам достаточно большой влажности ( $W > 5\%$ ).

Модель 2 определяет среды с заметным, но меньшим, чем для модели 1, значением  $\Gamma$ , у которых  $\varepsilon'$  значительно уменьшается с частотой при  $f < 10^8$  Гц и мало меняется при  $f > 10^8$  Гц. Это соответствует суглинкам и глинам при  $W < 5\%$ , морским льдам, пескам и песчаникам с большой влажностью ( $W > 15\%$ ).

Модель 3 характеризует среды, у которых  $\Gamma > 1$  дБ/м при  $f < 10^8$  Гц и  $\Gamma \approx 10 \div 20$  дБ/м при  $f = 10^{10}$  Гц, а  $\varepsilon'$  мало меняется при  $f < 10^8$  Гц и практически не меняется при  $f > 10^8$  Гц. К таким средам относятся сухие и увлажненные пески, известняки, сланцы, влажные угли и граниты, асфальт, бетон, кирпич.

Модель 4 соответствует средам с  $\Gamma < 1$  дБ/м при  $f \approx 10^{10}$  Гц и практически неизменным  $\epsilon'$ . Это пресный лед, мрамор, сухие угли и гранит, кальцит, доломит, гипс, каменная соль, снег (для снега  $\epsilon'$  меньше чем для других сред этой группы).

В перечисленные группы сред не входят морская и пресная вода и торф, которые характеризуются большими значениями  $\epsilon'$  ( $\epsilon'=80$  у воды и  $\epsilon'=60$  у торфа), практически не меняющиеся в диапазоне частот  $10^6$ - $10^9$  Гц. Для пресной воды  $\Gamma$  при увеличении  $f$  от  $10^6$  Гц до  $10^{10}$  Гц резко возрастает от 2 до 3700 дБ/м. Для морской воды  $\Gamma$  увеличивается от 40 до  $4 \cdot 10^3$  дБ/м при изменении  $f$  от  $10^6$  до  $10^{10}$  Гц [50].

В таблице 2.1 представлена частотная зависимость электрических характеристик для выделенных моделей сред, а так же для воды при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Для частот меньше чем  $10^6$  Гц принято, что их электрические свойства постоянны и не зависят от частоты.

ТАБЛИЦА 2.1 – Частотная зависимость электрических характеристик для выделенных моделей сред [50, 69, 70]

$f$ , Гц	Модель 1		Модель 2		Модель 3		Модель 4		Пресная вода		Морская вода	
	$\Gamma$ , дБ/м	$\epsilon'$	$\Gamma$ , дБ/м	$\epsilon'$								
$1 \cdot 10^6$	1	20	0,5	15,0	0,02	8,0	0,010	5,0	1,5	84	36,4	80
$3 \cdot 10^6$	2	18	1,0	10,0	0,05	7,0	0,015	4,5	1,7	84	–	80
$1 \cdot 10^7$	4	15	2,0	8,0	0,10	6,0	0,020	4,0	2,0	84	114,5	80
$3 \cdot 10^7$	10	14	5,0	7,0	0,40	5,0	0,100	4,0	2,0	84	196,3	80
$1 \cdot 10^8$	16	13	8,0	6,0	1,00	4,5	0,200	3,5	2,0	84	346,3	80
$3 \cdot 10^8$	30	12	10,0	5,0	2,00	4,5	0,500	3,5	4,0	84	537,6	78
$1 \cdot 10^9$	70	10	15,0	4,0	5,00	4,5	0,600	3,5	30,4	82	752,6	76
$3 \cdot 10^9$	160	7	30,0	3,5	10,00	4,5	0,800	3,5	304,7	80	$1 \cdot 10^3$	72
$1 \cdot 10^{10}$	800	5	150,0	3,5	20,00	4,0	1,000	3,5	3704	70	$4,4 \cdot 10^3$	62

Используя данные таблицы 2.1 можно более точно рассчитать максимальную дальность действия радиолокационных методов при контроле свойств различных сред и обнаружении в них неоднородностей.

При осуществлении геомеханического контроля в условиях подземных горных выработок с креплением и применении скважинных методов измерения НДС вмещающих пород, попадание в забой наблюдательной скважины, буримой в железобетонной крепи горной выработки, металлической арматуры нередко приводит к искривлению ее ствола. Это часто вызывает усложнение условий проведения исследований и невозможность размещения измерительного оборудования в скважине. Кроме того, попадание арматуры в область проведения измерений часто является причиной искажения экспериментальных данных. Толщина железобетонной крепи горной выработки, как правило, изменяется в пределах от 0,1 м до 3 м; при этом шаг ее армирования составляет 0,15-3 м, а диаметр арматуры от 6 до 90 мм [6, 83]. Для исключения попадания буровых снарядов породоразрушающих машин (диаметр которых может варьироваться в пределах от 65 до 130 мм) в металлическую арматуру необходимо знать достаточно точное ее местоположение в бетоне. Для выбора оптимального частотного диапазона приемо-передающей радиоаппаратуры целесообразно предварительно теоретически оценить максимальную дальность радиолокационного метода при обнаружении «бесконечно длинной» металлической арматуры заданного диаметра в среде типа бетон.

## **2.2. Оценка предельной дальности обнаружения арматуры в железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом**

Под *дальностью* обнаружения понимают максимальную глубину залегания арматуры, при которой отраженная от нее электромагнитная волна может быть выделена применяемым приемником [50, 85].

Основное ограничение дальности действия георадара – ее зависимость от электрофизических свойств изучаемой среды. Попытки учесть это ограничение известными способами связаны с определенными трудностями. Их преодолению диссертантом уделено особое внимание при оценке дальности действия георадиолокационного метода в конкретных условиях ведения горных работ.

Так, при заданных параметрах источника электромагнитного сигнала дальность его распространения может изменяться от нескольких метров в глинах до тысяч метров в скальных породах. Динамические характеристики отраженных волн, регистрируемых при георадарных исследованиях, сложным образом зависят от спектра зондирующего сигнала, диэлектрической проницаемости и проводимости геосреды. При этом сами электрические свойства реальных гетерогенных и многофазных сред являются, как было показано выше (п. 2.3), функциями частоты. В этих условиях строгое решение задачи об изменении интенсивности и формы электромагнитных волн в процессе их распространения часто невозможно. Поэтому, как правило, оценку дальности георадарных исследований можно проводить только на основе классической теории распространения электромагнитных волн, заведомо допуская достаточно большие отклонения расчетных величин от реальных.

Как было отмечено в п. 2.3, в проводящих средах существует поглощение и дисперсия фазовых и групповых скоростей распространения электромагнитных волн [50, 51, 72]. Это приводит к уменьшению интенсивности и изменению формы электромагнитных импульсов по мере их распространения в среде с потерями, определяя тем самым практически достижимую дальность метода (при заданном пороге чувствительности применяемой измерительной аппаратуры).

На практике общепринятыми методами увеличения дальности обнаружения объектов являются *увеличение мощности передатчика, изменение спектрального состава излучаемых импульсов либо синхронное накопление* [51, 75]. Каждый из этих методов имеет свои естественные ограничения.

*Понижение частоты* возбуждаемых электромагнитных колебаний зачастую приводит к потере разрешающей способности измерительной системы по дальности, а в области частот меньше 20 МГц – к выходу на существенно нелинейную часть

дисперсионных кривых, что, в свою очередь, резко сужает область использования полученных при таком возбуждении параметров разреза, так как они могут относиться только к узкому частотному диапазону [51, 75].

*Синхронное накопление* имеет ограничения, связанные с разрядностью аналого-цифровых преобразователей и периодом следования зондирующих импульсов.

Наиболее активно развивается техника в области *увеличения мощности георадаров*, и на этом основании строятся предположения о том, что увеличение мощности георадара в тысячи раз приведет к увеличению дальности обнаружения объектов до сотен метров даже в низкоомных высокопоглощающих породах типа глин [51, 75].

*Расчет мощности отраженного от металлической арматуры сигнала, наводимого на входе приемника георадиолокационной системы*

Применительно к рассматриваемой в диссертации задаче обследования железобетонной крепи горной выработки, необходимо обеспечить высокую разрешающую способность георадара при измерении дальности до арматуры в диапазоне глубин от 0,1 до 3 м.

В этой связи рассмотрим аналитическое описание и форму зондирующего электромагнитного сигнала, отраженного от металлической арматуры, расположенной в бетонной обделке горной выработки с  $\varepsilon' \approx 6,5$ , тангенсом угла потерь  $\operatorname{tg}\delta \approx 0,15$ . Диаметр арматуры также примем равным 10 мм и 25 мм и длиной много больше  $\lambda$ , материал – сталь.

В таком случае форму сигнала, отраженного от проводящей поверхности арматуры и наведенного в приемнике, можно описать функцией [75]:

$$S_{\text{отп}}(t) = \frac{V_{\perp} \cdot S_{\text{цил}} \cdot e^{-\frac{\pi(t-kT-\tau')^2}{\tau^2}} \cdot e^{i[\omega(t-kT-\tau')-\phi]} \cdot e^{-2k_{\text{бетон}}R}}{R^2}, \quad (2.7)$$

где  $S_{\text{цил}}$  – эффективная отражающая поверхность арматуры при нормальном падении на него электромагнитной волны рассчитывается по формуле (2.7);  $\tau'$  – постоянная

времени, определяемая временем прохождения сигнала в бетоне расстояния от передающей антенны до арматуры и обратно [75]:

$$\tau' = \frac{2 \cdot R \cdot \cos \psi}{v}, \quad (2.8)$$

где  $\psi$  – угол, определяющий разнесение между передающей и приемной антеннами;

$v$  – скорость распространения электромагнитной волны в среде:  $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}$ .

Коэффициент отражения  $V_{\perp}$  от проводящей поверхности арматуры можно принять равным +1, а фаза отраженного сигнала по отношению к излучаемому изменяется на  $180^{\circ}$  [83]. На рисунке 2.1 представлены результаты расчета отраженного зондирующего импульса от металлической арматуры при нормальном падении на нее электромагнитной волны, излучаемой георадаром. Здесь принято, что на глубине до 200 мм бетон однороден. Сигнал  $S(t)$  есть суперпозиция излучаемого (1) и отраженного (2) сигналов для импульса длительностью 1 нс.

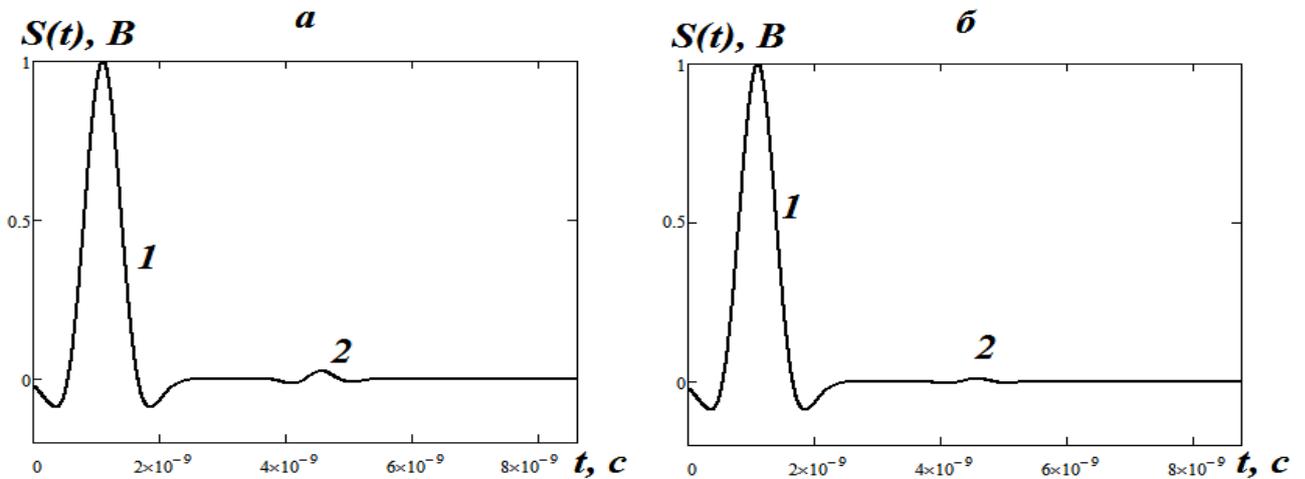


Рисунок 2.1 – Формы отражения широкополосного импульсного сигнала георадара от границы раздела сред «бетон – металлическая арматура» для расстояния  $R = 0,2$  м для диаметра арматуры 25 мм (а) и 10 мм (б): 1 – излучаемый и 2 – отраженный импульсы

Далее представлены расчеты мощности отраженного от арматуры зондирующего электромагнитного сигнала, наводимого на входе приемника, с учётом прохождения сигнала вдоль траектории «передатчик – объект поиска – приемник» для оценки глубинности георадиолокационного метода. Модель взаимодействия приемо-передающей системы с объектом поиска представлена на рисунке 2.2.

Расчеты выполнялись с учетом следующих параметров (ограничений):

- мощность излучаемого сигнала – 1 Вт;
- бетон в пределах распространения электромагнитных волн однородный;
- объект обнаружения представляет собой «бесконечно длинную» металлическую арматуру диаметром от 10 мм до 25 мм.

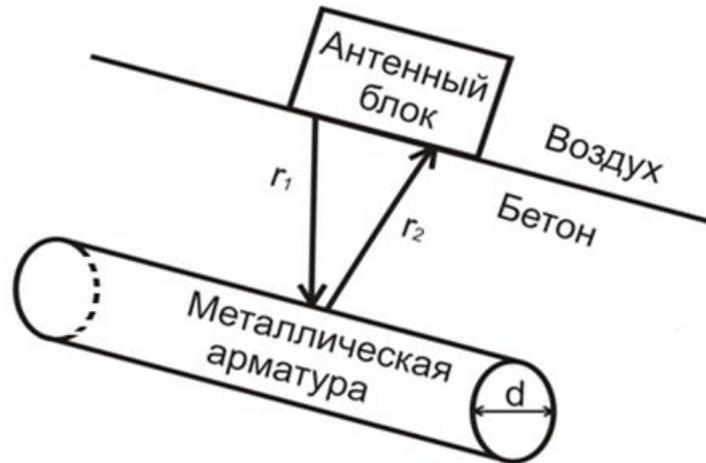


Рисунок 2.2 – Модель взаимодействия приемо-передающей системы с бесконечно длинной проводящей арматурой:  $d$  – диаметр арматуры;  $r_1$  – расстояние, пройденное зондирующим электромагнитным сигналом от передающей антенны до «цели»;  $r_2$  – расстояние, пройденное зондирующим электромагнитным сигналом от «цели» до приемной антенны

Электромагнитный сигнал, отраженный от изучаемого объекта, фиксируется приемной антенной. Он характеризуется соответствующей мощностью (с учётом коэффициента отражения от бесконечно длинной проводящей арматуры) на входе приемной антенны и рассчитывается по известному соотношению [87]:

$$P_{\text{приемн}} = \frac{P_{\text{изл}} \cdot G_{\text{пер}}}{L_1} \cdot \frac{1}{4\pi r_1^2} \cdot \frac{1}{L_2} \cdot S_{\text{цел}} \cdot \frac{1}{4\pi r_2^2} \cdot \frac{G_{\text{приемн}} \lambda_{\text{ср}}^2}{4\pi L_4}, \quad (2.9)$$

где  $P_{\text{изл}}$  – мощность передатчика, 1 Вт;

$G_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны в направлении цели;

$L_2$  и  $L_1$  – коэффициенты потерь в приемной и передающей антеннах;

$r_1$  – расстояние между передающей антенной и арматурой;

$r_2$  – расстояние между приемной антенной и арматурой;

$G_{\text{приемн}}$  – коэффициент усиления приемной антенны в направлении «цели»;

$\lambda_c$  – длина волны в среде распространения (на высоких частотах можно принять в соответствии с [51, 72, 87]  $\lambda_c = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon'}}$ , для бетона  $\varepsilon' = 6,5$ );

$L_3$  и  $L_4$  – коэффициенты, учитывающие потери в среде распространения между передающей антенной и «целью», а также между объектом обнаружения и приемной антенной:

$L_3 = e^{2\beta \cdot r_1}$ ,  $L_4 = e^{2\beta \cdot r_2}$  ( $\beta$  – коэффициент поглощения, рассчитанный по формуле [88]:  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{60\sigma\lambda}{\varepsilon'}\right)^2} - 1} \approx 60\pi\sigma \sqrt{\frac{1}{\varepsilon'}}$ , для бетона  $\beta = 0,64$ );

$S_{\text{цил}}$  – эффективная площадь рассеяния «бесконечного» проводящего цилиндра (который представляет собой арматуру).

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) бесконечного идеально проводящего цилиндра (с диаметрами  $d=10-25$  мм) в среде с потерями может быть приближенно оценена в рамках метода геометрической оптики [74, 88] (для  $|k| \cdot r > 1$ ):

$$S_{\text{цил}}(\gamma) = \pi \frac{d}{2} e^{2d\beta \cos(\gamma)} \cos(\gamma), \quad (2.10)$$

где  $\gamma$  – угол падения плоской электромагнитной волны на поверхность цилиндра относительно нормали, восстановленной в точке падения (максимальное значение эффективной площади рассеяния будет при нормальном падении электромагнитной волны на поверхность «цели», т.е.  $\gamma = 0^\circ$ ).

При проведении расчетов потерями в приёмной и передающей антеннах пренебрегаем ( $L_1$  и  $L_2$  полагаем равными 1), а также полагаем  $G_{\text{пер}}$  и  $G_{\text{приемн}}$  равными единице.

Мощность на входе приёмной антенны в основном определяется эффективной площадью рассеяния объекта, потерями в геосреде и рабочей частотой передатчика. Значения  $P_{\text{приемн}}$ , рассчитанные на основании выражения (2.10) представлены в таблицах 2.2 и 2.3.

ТАБЛИЦА 2.2 – Значение  $P_{\text{приемн}}$  (Вт) для различных частот передатчика электромагнитных волн (для металлической арматуры диаметром 10 мм)

$R, \text{ м}$	$f=1 \text{ ГГц}$	$f=2 \text{ ГГц}$	$f=3 \text{ ГГц}$
0,1	$8,60 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$9,55 \cdot 10^{-5}$
0,3	$6,36 \cdot 10^{-6}$	$1,59 \cdot 10^{-6}$	$7,06 \cdot 10^{-7}$
0,5	$4,94 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$5,48 \cdot 10^{-8}$
0,7	$7,70 \cdot 10^{-8}$	$1,92 \cdot 10^{-8}$	$8,56 \cdot 10^{-9}$
0,9	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$4,22 \cdot 10^{-9}$	$1,87 \cdot 10^{-9}$
1,0	$8,58 \cdot 10^{-9}$	$2,14 \cdot 10^{-9}$	$9,50 \cdot 10^{-10}$
1,5	$4,71 \cdot 10^{-10}$	$1,17 \cdot 10^{-10}$	$5,23 \cdot 10^{-11}$
1,7	$1,71 \cdot 10^{-10}$	$4,28 \cdot 10^{-11}$	$1,90 \cdot 10^{-11}$
2,0	$4,14 \cdot 10^{-11}$	$1,03 \cdot 10^{-11}$	$4,60 \cdot 10^{-12}$
2,5	$4,72 \cdot 10^{-12}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$	$5,24 \cdot 10^{-13}$
2,7	$2,08 \cdot 10^{-12}$	$5,20 \cdot 10^{-13}$	$2,31 \cdot 10^{-13}$

ТАБЛИЦА 2.3 – Значение  $P_{\text{приемн}}$  (Вт) для различных частот передатчика электромагнитных волн (для металлической арматуры диаметром 25 мм)

$R, \text{ м}$	$f=1 \text{ ГГц}$	$f=2 \text{ ГГц}$	$f=3 \text{ ГГц}$
0,1	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$	$2,43 \cdot 10^{-4}$
0,3	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-6}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$
0,5	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^{-7}$	$1,39 \cdot 10^{-7}$
0,7	$1,96 \cdot 10^{-7}$	$4,90 \cdot 10^{-8}$	$2,18 \cdot 10^{-8}$
0,9	$4,30 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$4,78 \cdot 10^{-9}$
1,1	$1,15 \cdot 10^{-8}$	$2,89 \cdot 10^{-9}$	$1,28 \cdot 10^{-9}$
1,5	$1,21 \cdot 10^{-9}$	$3,00 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-10}$
1,7	$4,36 \cdot 10^{-10}$	$1,09 \cdot 10^{-10}$	$4,84 \cdot 10^{-11}$
2,0	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$2,64 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-11}$
2,5	$1,20 \cdot 10^{-11}$	$3,00 \cdot 10^{-12}$	$1,33 \cdot 10^{-12}$
2,7	$5,30 \cdot 10^{-12}$	$1,32 \cdot 10^{-12}$	$5,89 \cdot 10^{-13}$

Как следует из результатов расчетов с учетом технически достижимой относительной чувствительности приемника по мощности 120-140 дБ ( $10^{-12}$  -  $10^{-14}$  Вт) или по напряжению в единицы мкВ теоретически можно определять местоположение метал-

лической арматуры (диаметром от 10 до 25 мм) в железобетонной обделке горной выработки на глубине до 2,7 м при частоте передатчика до 3 ГГц.

Данные расчеты выполнены для максимальных значений коэффициента передачи указанной выше приёмно-передающей аппаратуры. В реальных условиях дальность обнаружения местоположения металлической арматуры в выбранном диапазоне частот может существенно отличаться от теоретически рассчитанной, поскольку определяется реальной диэлектрической проницаемостью и проводимостью бетона, используемого в крепях, степенью его однородности, а также параметрами применяемого в экспериментах приёмно-передающего оборудования.

В связи с этим, необходимо с помощью модельных и натуральных экспериментальных исследований оценить реальные возможности использования радиолокационного метода для решения задач определения местоположения металлической арматуры в железобетонной крепи горных выработок, а также задач исследования механического состояния вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив».

### **2.3. Влияние нарушенности и влажности массива вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив» на глубинность георадиолокационного метода**

Диссертантом совместно с Е.В. Денисовой были выполнены экспериментальные стендовые исследования влияния физико-механических свойств геосреды на точность геофизических методов при локации подземных объектов [89].

Для дополнения полученных результатов стендовых исследований и для оценки применимости георадиолокационного метода к решению задач горного дела и его дальности действия выполнено физическое моделирование процесса обследования механического состояния вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив».

Модель зоны контакта «крепь – массив» по отношению к натуре была выполнена с соблюдением ряда критериев подобия [90, 91].

Линейные параметры исследуемого объекта были приняты, исходя из геометрического масштаба моделирования:

$$\alpha = \frac{l_n}{l_m} = const, \quad (2.11)$$

где  $l_n, l_m$  – длина любых отрезков соответственно в натуре и модели.

Электрофизические параметры материалов модели и природы как безразмерные величины должны быть равны:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_m, \mu_n = \mu_m, \quad (2.12)$$

где  $\varepsilon_n, \mu_n$  и  $\varepsilon_m, \mu_m$  – диэлектрическая и магнитная проницаемость материала природы и модели соответственно.

Согласно общим принципам электродинамики, а также с учетом (2.12), можно заключить, что параметры зондирующего сверхвысокочастотного электромагнитного излучения в натуре и модели соответствуют, т.е. масштабный коэффициент равен 1.

В натуральных условиях мощность массива вмещающих пород много больше толщины железобетонной крепи. Однако, невыполнение условия (2.11) применительно к данному случаю не нарушает общие принципы подобия, поскольку нас интересует только зона контакта «крепь – массив».

Для выполнения моделирования был разработан и изготовлен специальный стенд. На рисунке 2.3 представлены схема (а) проведения физического моделирования и фотография (б) стенда с используемым оборудованием.

На основании из пенопласта 1 размещены два бетонных блока 2, 3 габаритными размерами 600×250×100 мм, моделирующие механический контакт железобетонной крепи и массива вмещающих пород.

Электрофизические свойства сухого бетона мало отличаются от электрофизических свойств широко распространенных силикатных горных пород, например, гнейсов, поэтому общие принципы подобия не нарушаются при моделировании массива вмещающих пород бетонным блоком.

Блоки 2, 3 разделены прослоем 5 с изменяемыми механическими свойствами. Он моделирует зону нарушенности породного массива в зоне контакта «крепь –

массив». Влажность и размеры фракций прослой 5 варьируются путем помещения в него различного по составу заполнителя – сухого ( $W < 5\%$ ) и влажного ( $W \approx 20\%$ ) песка, щебня с фракциями 0-5 мм, 40-70 мм. Толщина прослой 5 изменяется в пределах от 10 мм до 100 мм.

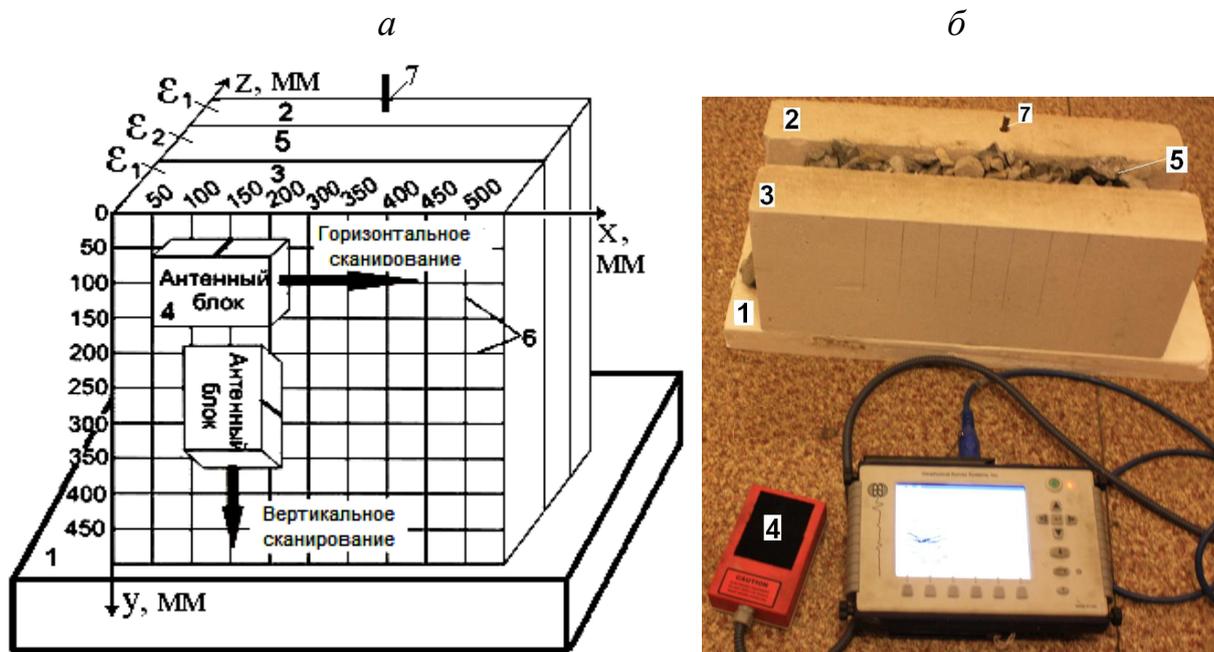


Рисунок 2.3 – Схема проведения модельного эксперимента: стенд (а) для эксперимента и его фотография с оборудованием (б): 1 – подставка из пенопласта; 2, 3 – бетонные блоки; 4 – антенный блок георадара SIR-3000 с центральной частотой 2600 МГц; 5 – прослой переменной мощности и с различными физико-механическими свойствами заполнителя, моделирующий зону контакта «железобетонная крепь – массив»; 6 – контрольные линии сетки для проставления измерительных меток; 7 – металлический стержень

Антенный блок георадара 4 с центральной частотой 2600 МГц перемещался параллельно бетонному блоку 3 вдоль оси  $x$ , измерительные метки проставлялись при пересечении центра антенного блока с каждой линией сетки 6. Затем зарегистрированные радарограммы были обработаны с помощью программного обеспечения RADAN.

Основная задача физического моделирования – исследовать дальности действия метода сверхвысокочастотной (до 3 ГГц) георадиолокации при обследовании механического состояния массива вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив» при фиксированной частоте зондирующего электромагнитного сигнала и толщины бетонной крепи. Для удобства и наглядности определения максимальной

дальности георадиолокационного метода, а также для получения информации об отраженных от протяженных проводящих неоднородностей (размеры которых много больше длины волны) сигналах, в бетонный блок 2 на расстоянии 40 мм от зоны контакта «крепь – массив» был заглублен металлический стержень диаметром 10 мм и длиной 100 мм.

Поскольку металлическая арматура является сосредоточенным объектом, то ориентация в пространстве приемной и передающей антенн относительно обнаруживаемой неоднородности должна влиять на глубинность и информативность георадиолокационного метода.

В соответствии с отмеченным ранее, распространение электромагнитных волн в среде описывается уравнением (2.1). При этом, если изменение вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  электромагнитной волны упорядочено в пространстве, то говорят, что электромагнитная волна поляризована [83-85]. Существует несколько видов поляризации: плоская или линейная (когда колебание вектора происходит в определенной плоскости, а траектория его изменения представляет собой прямую) и эллиптическая (когда колебания вектора  $E$  описывают в пространстве эллипс).

В общем виде монохроматическая линейно-поляризованная волна, распространяющаяся вдоль оси  $y$  описывается выражениями вида [83]:

$$E_z = E_m \cos(\omega t - ky + \varphi), \quad (2.13)$$

$$H_x = H_m \cos(\omega t - ky + \varphi), \quad (2.14)$$

где  $k$  – волновое число, а  $\varphi = m\pi$ ,  $m=0,1,2\dots$

Зондирующий электромагнитный сигнал при падении на металлическую арматуру наводит в ней токи, которые, в свою очередь, порождают отраженный электромагнитный сигнал. В случае, когда приемник (представляющий собой щелевую или дипольную антенну) находится в плоскости, параллельной плоскости расположения арматуры и ориентирован в пространстве параллельно металлическому стержню, то поле отраженного сигнала имеет такую же поляризацию, что и приемная антенна. В таком случае, потери полезного сигнала из-за различия в поляризации будут мини-

мальными, что, соответственно, обеспечивает большую дальность действия георадиолокационного метода. В случае, когда стержень арматуры ориентирован перпендикулярно приемной антенне, потери из-за различия в поляризации отраженного сигнала и приемника будут превышать регистрируемый полезный сигнал, что приводит к снижению дальности действия георадиолокационного метода.

В процессе работы георадара в натуральных условиях антенный блок перемещается по поверхности обследуемого участка крепи, и заранее учесть ориентацию приемника и передатчика относительно присутствующих на исследуемом участке механических неоднородностей не представляется возможным. Поэтому для удобства интерпретации экспериментальных данных далее будем считать, что антенный блок ориентирован «продольно» («продольная» ориентация), когда излучатель и приемник ориентированы перпендикулярно направлению его перемещения. На рисунке 2.4 представлены пояснения к определению ориентации антенны.

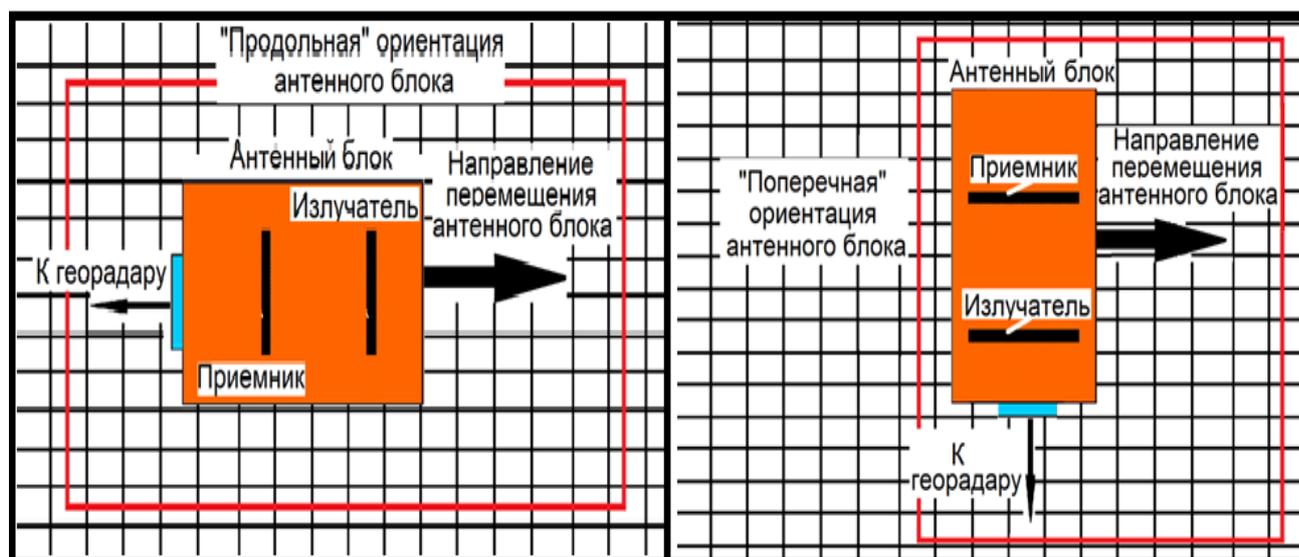


Рисунок 2.4 – Пояснения к определению ориентации антенного блока относительно направления перемещения при георадарном обследовании участка породного массива

В случае, когда излучатель и приемник расположены параллельно направлению перемещения антенного блока, будем считать, что антенный блок ориентирован «поперечно» («поперечная» ориентация).

С учетом изложенного выше, выполнено физическое моделирование процесса обследования механического состояния вмещающих пород в зоне контакта «крепь –

массив» при различном заполнителе этой зоны. В качестве примера на рисунках 2.5 – 2.9 представлены радарограммы, полученные при георадиолокационном обследовании модели при «продольной» ориентации антенного блока относительно направления его перемещения. Буквами *a* обозначены волновые картины, соответствующие заполнению зоны контакта «крепь – массив» воздухом, *б* – сухим песком ( $W < 5\%$ ), *в* – влажным песком ( $W \approx 20\%$ ), *г* – мелким щебнем, *д* – крупным щебнем.

Обобщенные результаты физического моделирования представлены в таблицах 2.4 – 2.5.

Расчет погрешностей выполнялся в соответствии со следующими выражениями:

Абсолютная погрешность  $\Delta$  и относительная погрешность  $\delta$  измерений вычислялись по формулам [92]:

$$\Delta = x_p - x_{II}, \quad (2.15)$$

$$\delta = \frac{x_p - x_{II}}{x_{II}} \cdot 100\% . \quad (2.16)$$

где  $x_p$  – результат измерений;  $x_{II}$  – истинное значение измеряемой величины.

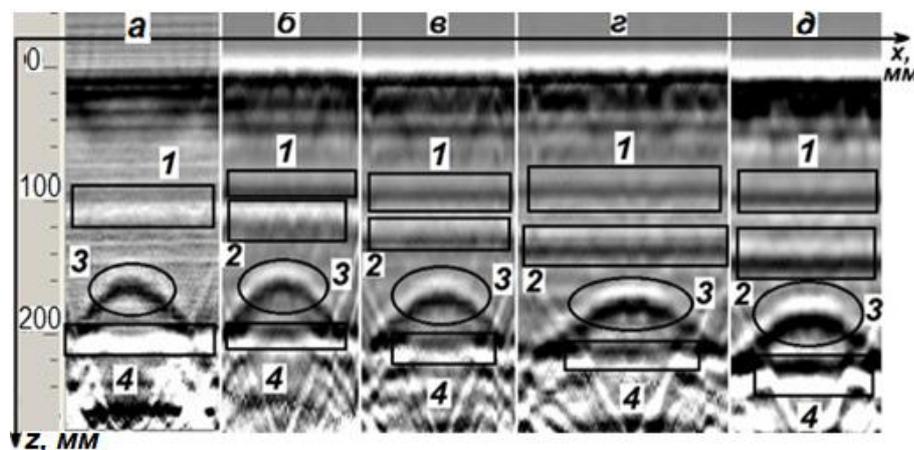


Рисунок 2.5 – Результаты физического моделирования для толщины зоны контакта «крепь – массив» в 20 мм при «продольной» ориентации антенного блока: 1 – сигнал, отраженный от ближней границы зоны контакта «крепь-массив»; 2 – сигнал, отраженный от дальней границы зоны контакта «крепь – массив»; 3 – сигнал, отраженный от металлического стержня

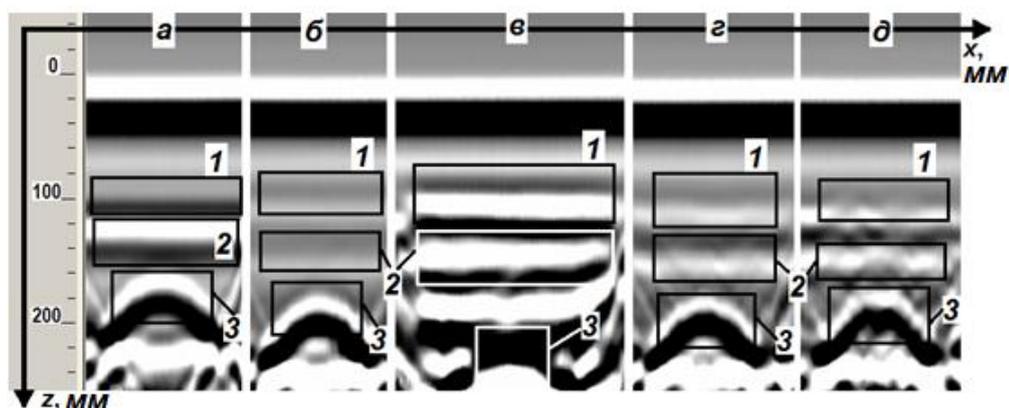


Рисунок 2.6 – Результаты физического моделирования для толщины зоны контакта «крепь – массив» в 30 мм при «продольной» ориентации антенного блока: 1 – сигнал, отраженный от ближней границы зоны контакта «крепь-массив»; 2 – сигнал, отраженный от дальней границы зоны контакта «крепь – массив»; 3 – сигнал, отраженный от металлического стержня

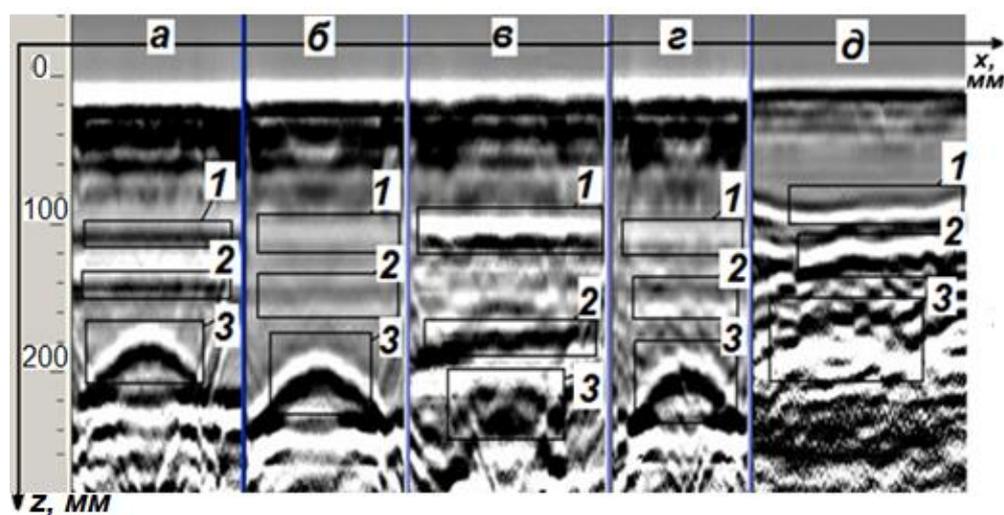


Рисунок 2.7 – Результаты физического моделирования для толщины зоны контакта «крепь – массив» в 40 мм при «продольной» ориентации антенного блока: 1 – сигнал, отраженный от ближней границы зоны контакта «крепь – массив»; 2 – сигнал, отраженный от дальней границы зоны контакта «крепь – массив»; 3 – сигнал, отраженный от металлического стержня

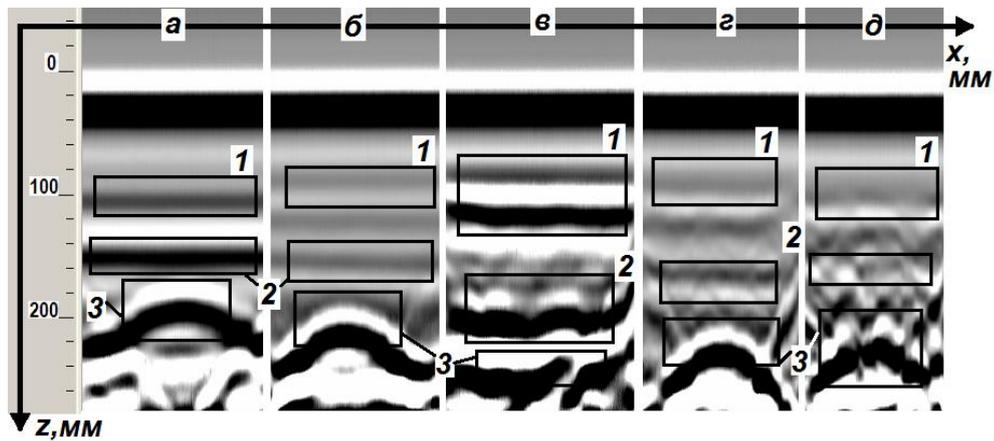


Рисунок 2.8 – Результаты физического моделирования для толщины зоны контакта «крепь – массив» в 50 мм при «продольной» ориентации антенного блока: 1 – сигнал, отраженный от ближней границы зоны контакта «крепь – массив»; 2 – сигнал, отраженный от дальней границы зоны контакта «крепь – массив»; 3 – сигнал, отраженный от металлического стержня

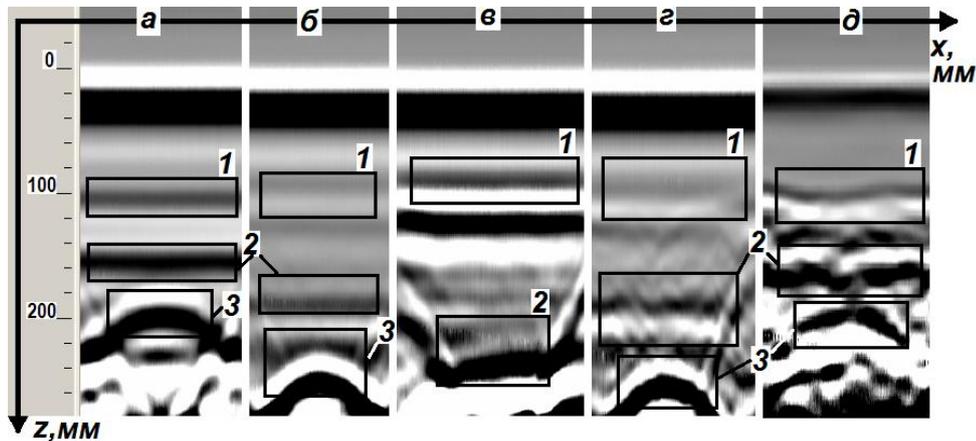


Рисунок 2.9 – Результаты физического моделирования для толщины зоны контакта «крепь – массив» в 60 мм при «продольной» ориентации антенного блока; 1 – сигнал, отраженный от ближней границы зоны контакта «крепь – массив»; 2 – сигнал, отраженный от дальней границы зоны контакта «крепь – массив»; 3 – сигнал, отраженный от металлического стержня

На рисунке 2.10 представлена радарограмма, полученная при георадиолокационном обследовании модели при «поперечной» ориентации антенного блока относительно направления перемещения. Обозначения волновых картин буквами *а-д* соответствует обозначениям, принятым на рисунках 2.5-2.9.

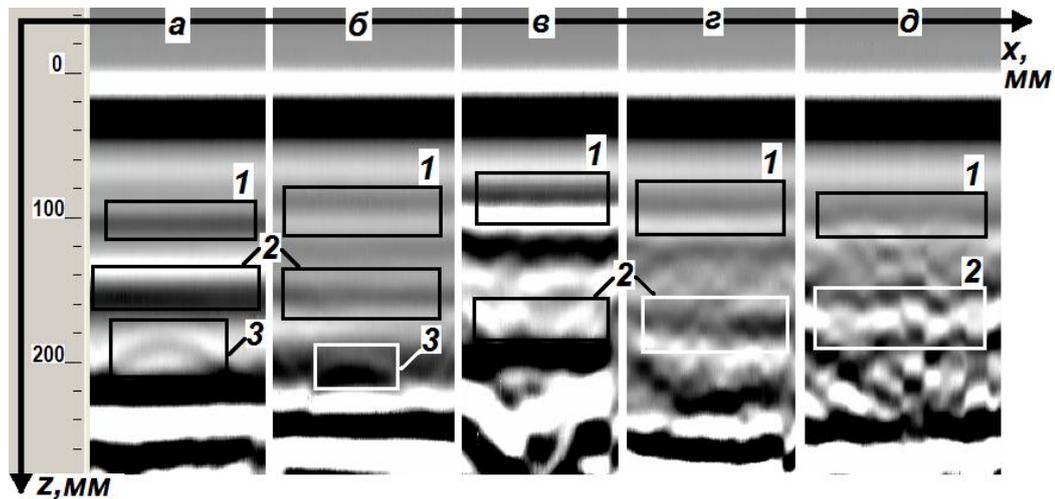


Рисунок 2.10 – Результаты физического моделирования для толщины зоны контакта «крепь – массив» в 50 мм при «поперечной» ориентации антенного блока: 1 – сигнал, отраженный от ближней границы зоны контакта «крепь – массив»; 2 – сигнал, отраженный от дальней границы зоны контакта «крепь – массив»; 3 – сигнал, отраженный от металлического стержня

ТАБЛИЦА 2.4 – Результаты физического моделирования при заполнении зоны механического контакта «крепь – массив» воздухом

Ширина прослая, мм	Ориентация антенного блока относительно направления его движения	Глубина залегания металлического стержня, определенная экспериментально, мм	Реальная глубина залегания металлического стержня, мм	Относительная погрешность определения дальности, %
20	«продольная»	152	165	7,88
	«поперечная»	155	165	6,06
30	«продольная»	156	175	10,86
	«поперечная»	156	175	10,86
40	«продольная»	160	185	13,51
	«поперечная»	160	185	13,51
50	«продольная»	167	195	14,36
	«поперечная»	176	195	9,74
60	«продольная»	171	205	16,59
	«поперечная»	–	205	–

ТАБЛИЦА 2.5 – Результаты физического моделирования при заполнении зоны механического контакта «крепь – массив» сухим песком ( $W < 5\%$ )

Ширина прослоя, мм	Ориентация антенного блока относительно направления его движения	Глубина залегания металлического стержня, определенная экспериментально, мм	Реальная глубина залегания металлического стержня, мм	Относительная погрешность определения дальности, %
20	«продольная»	158	165	4,24
	«поперечная»	158	165	4,24
30	«продольная»	168	175	4,00
	«поперечная»	168	175	4,00
40	«продольная»	176	185	4,86
	«поперечная»	178	185	3,78
50	«продольная»	187	195	4,10
	«поперечная»	188	195	3,59
60	«продольная»	204	205	0,49
	«поперечная»	205	205	0,00
80	«продольная»	221	220	0,45
	«поперечная»	–	220	–
100	«продольная»	246	240	2,50
	«поперечная»	–	240	–

ТАБЛИЦА 2.6 – Результаты физического моделирования при заполнении зоны механического контакта «крепь – массив» влажным песком ( $W \approx 20\%$ )

Ширина прослоя, мм	Ориентация антенного блока относительно направления его движения	Глубина залегания металлического стержня, определенная экспериментально, мм	Реальная глубина залегания металлического стержня, мм	Относительная погрешность определения дальности, %
20	«продольная»	170	165	3,03
	«поперечная»	–	165	–
30	«продольная»	204	175	16,57
	«поперечная»	–	175	–
40	«продольная»	210	185	13,51
	«поперечная»	–	185	3,03

ТАБЛИЦА 2.7 – Результаты физического моделирования при заполнении зоны механического контакта «крепь-массив» мелким щебнем (размеры фракций 0-5 мм)

Ширина просоя, мм	Ориентация антенного блока относительно направления его движения	Глубина залегания металлического стержня, определенная экспериментально, мм	Реальная глубина залегания металлического стержня, мм	Относительная погрешность определения дальности, %
20	«продольная»	162	165	1,82
	«поперечная»	166	165	0,61
30	«продольная»	173	175	1,14
	«поперечная»	–	175	–
40	«продольная»	186	185	0,54
	«поперечная»	–	185	–
50	«продольная»	207	195	6,15
	«поперечная»	–	195	–
60	«продольная»	223	205	8,78
	«поперечная»	–	205	–
80	«продольная»	224	220	1,82
	«поперечная»	162	220	–

ТАБЛИЦА 2.8 – Результаты физического моделирования при заполнении зоны механического контакта «крепь-массив» крупным щебнем (размеры фракций 40-70 мм)

Ширина просоя, мм	Ориентация антенного блока относительно направления его движения	Глубина залегания металлического стержня, определенная экспериментально, мм	Реальная глубина залегания металлического стержня, мм	Относительная погрешность определения дальности, %
20	«продольная»	163	165	1,21
	«поперечная»	–	165	–
30	«продольная»	176	175	0,57
	«поперечная»	–	175	–
40	«продольная»	178	185	3,78
	«поперечная»	–	185	–
50	«продольная»	180	195	7,69
	«поперечная»	–	195	–

После анализа экспериментальных данных можно сделать вывод, что при обследовании состояния зоны механического контакта «крепь – массив» при неизменной частоте сверхвысокочастотного (2600 МГц) электромагнитного зондирующего сигнала максимальная дальность действия георадиолокационного метода обеспечивается, когда линейные размеры фракций в зоне механического контакта много меньше длины волны зондирующего сигнала, а диэлектрическая проницаемость слоев эквивалентна ( $\epsilon_1/\epsilon_2 = 0,75 \div 1,25$ ). При возрастании линейных размеров фракций  $L$  до величины, равной длине волны  $\lambda$  в геосреде ( $\lambda/L=0,5 \div 1$ ), на радарограммах фиксируются многочисленные переотражения зондирующего сигнала от граней фракций слоя-заполнителя, что существенно снижает мощность принимаемого полезного сигнала, а, следовательно, и глубинность георадиолокационного метода. При увеличении контраста (отношения  $\epsilon_1/\epsilon_2$ ) диэлектрических проницаемостей слоев от 1 до 4 дальность действия георадиолокационного метода снижается на 30%, а погрешность определения глубины расположения бетонного блока 2 возрастает на 11%. Это связано с тем, что при обработке данных измерений программное обеспечение RADAN не позволяет учитывать вариацию диэлектрической проницаемости вмещающих слоев [96].

Как следует из анализа результатов моделирования, на информативность георадиолокационного метода существенно влияет ориентация излучателя и приемника приемо-передающей антенны относительно расположения протяженной неоднородности. Так, при «продольной» ориентации антенного блока обеспечивается наибольшая дальность действия георадиолокационного метода. Однако при «поперечной» ориентации антенного блока более четко регистрируются сигналы, отраженные от границ раздела слоев в зоне контакта «крепь – массив».

На основании изложенного в данной главе материала сформулировано первое научное положение: *при фиксированной частоте 2600 МГц зондирующего сверхвысокочастотного электромагнитного сигнала увеличение линейных размеров фракций нарушенного массива вмещающих пород в зоне механического контакта «железобетонная крепь – массив» до величин, соразмерных с длиной волны, приводит к*

*снижению дальности действия георадиолокационного метода на 19%; при увеличении отношения диэлектрических проницаемостей бетона крепи и зоны нарушения на контакте «крепь – массив» до 1:4 дальность действия георадиолокационного метода уменьшается на 30%.*

## **Выводы**

Дано научное обоснование возможности применения георадиолокационного метода и реализующих его современных аппаратных средств для обследования железобетонных крепей подземных горных выработок на наличие металлической арматуры и иных неметаллических неоднородностей, а также при обследовании зоны контакта «крепь – массив» для построения карт локализации механических неоднородностей в обследованном участке железобетонной крепи.

С этой целью:

– выполнена оценка предельной дальности радиолокационного метода при определении местоположения металлической арматуры; при технически достижимой относительной чувствительности приемника по мощности 120-140 дБ ( $10^{-12}$  -  $10^{-14}$  Вт) или по напряжению – единицы мкВ теоретически можно локализовать местоположение металлической арматуры (диаметром от 10 до 25 мм) в железобетонной обделке горной выработки на глубине до 2,7 м при частоте передатчика до 3 ГГц;

– выполнено физическое моделирование процесса георадиолокационного обследования механического состояния закрепного пространства в зоне контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород», на основании которого можно заключить, что при значительном (от 4 и более раз) отличии диэлектрической проницаемости бетона и геоматериала в зоне механического контакта «крепь – массив» дальность действия георадиолокационного метода уменьшается на 30%; в случае, когда линейные размеры фракций прослоя эквивалентны длине волны зондирующего сигнала

дальность действия метода георадиолокации снижается за счет многочисленных переотражений электромагнитного зондирующего сигнала от граней частиц слоя на 19%; для обеспечения максимальной дальности действия георадиолокационного метода следует учитывать ориентацию антенного блока относительно направления его перемещения;

– результатами физического моделирования доказано, что дальность обнаружения местоположения арматуры, вычисленная на основе теоретических расчетов с принятыми допущениями, в выбранном диапазоне частот может быть значительно ниже, поскольку существенное влияние оказывают реальная диэлектрическая проницаемость бетона, степень его однородности и технические параметры приемопередающего оборудования;

– при практическом использовании георадиолокационного метода для получения достоверных экспериментальных данных необходима априорная информация о величине диэлектрической проницаемости обследуемого геоматериала;

– перед применением радиолокационных методов для решения отмеченного круга практических задач геомеханического мониторинга необходимо с помощью предложенных в диссертации натуральных экспериментов оценить реальные возможности использования применяемого георадиолокационного оборудования в конкретных горно-геологических и горно-технологических условиях.

Практической реализации последнего из отмеченных положений в натуральных условиях горного предприятия посвящена следующая глава диссертации.

### **ГЛАВА 3. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ВЫБОРА МЕСТ ЗАЛОЖЕНИЯ СКВАЖИН ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

В предыдущей главе была рассмотрена проблема глубинности георадиолокационного метода при георадиолокационном обследовании зоны контакта железобетонной крепи и окрестного породного массива. Теоретические расчеты дальности обнаружения металлической арматуры разного диаметра в бетоне, а также физическое моделирование процесса диагностики механического состояния вмещающих пород в зоне контакта «крепь – массив», представленные в главе 2, подтверждают применимость георадиолокационного метода для решения практических задач. Однако для эффективного использования указанного метода в горном деле следует разработать методику обследования железобетонной обделки горных выработок на наличие в ней механических неоднородностей; кроме того, результаты расчетов и моделирования требуют подтверждения натурными экспериментами в реальных условиях горного предприятия, чему и посвящена настоящая глава.

#### **3.1. Обоснование применимости метода георадиолокации для выбора мест заложения скважин геомеханических измерений**

В настоящее время ряд месторождений полезных ископаемых разрабатывается подземным способом в условиях роста глубины ведения горных работ. Например, в развитых странах, таких как США, Канада, ЮАР и др., подземная разработка месторождений ведется на глубинах более двух километров. Соответственно, добыча полезных ископаемых на больших глубинах в течение длительного периода времени требует применения методов крепления горных выработок для исключения динами-

ческих форм проявления горного давления и обеспечения безопасности производства [82].

Одним из наиболее надежных и долговечных видов крепи является железобетонная, применяемая в самых тяжелых горно-геологических условиях, для обеспечения длительной эксплуатации выработок. Как указано в работе [93], монолитной бетонной крепью в угольной промышленности России закреплено около 98 % вертикальных стволов, в горнорудной – 95 %, в горно-химической – 60 %. Аналогичная ситуация сложилась и в зарубежной практике. Широкое применение монолитного бетона для крепления стволов обусловлено рядом известных достоинств: высокой степенью механизации, долговечностью, огнестойкостью, сравнительно низкой стоимостью и т.д. При активном ведении горных работ нагрузки, действующие на крепь, значительно меняются с течением времени [86]. Поэтому вопрос диагностики и контроля механического состояния крепи и закрепного пространства, массива вмещающих пород, а также оценка остаточного ресурса их эксплуатации являются актуальными.

Существующие методы контроля напряжений и деформаций, действующих в обделке горных выработок, прогнозирования срока эксплуатации крепи, являются трудоемкими и требуют значительных финансовых затрат [82]. В связи с этим развитие методов неразрушающего контроля состояния железобетонных крепей, нарушения закрепного пространства с меньшими финансовыми и временными затратами весьма актуально. Они могут использоваться совместно с отмеченными в главе 1 классическими методами геоконтроля [4, 5, 8-17, 19-23, 26, 35, 42, 43] для повышения качества проходки измерительных скважин для диагностики НДС крепей и вмещающих массивов, обеспечивая обоснованный выбор подходящего для бурения участка крепи.

Так, при оценке напряжений методом параллельных скважин [23-25] полагается, что массив горных пород представляет собой сплошную, однородную, изотропную, линейно-упругую среду. По результатам испытания в параллельных скважинах на основе решения плоской задачи теории упругости определяют комплексную упругую характеристику, содержащую модуль упругости и коэффициент Пуассона-

на [23-25]. Соответствие указанных выше условий реальным параметрам исследуемого массива горных пород определяет точность и достоверность вычисляемых значений напряжений. Следовательно, качество сооружения скважин, а также пригодность массива для инструментальных исследований значительно влияют на начальные условия и соответствие параметров массива параметрам замещающей модели. Таким образом, вопрос выбора пригодного места для сооружения измерительных скважин, при котором возможность попадания в забой скважины неоднородностей массива была бы минимизирована или вовсе исключена, становится особенно актуальным.

В соответствии со сказанным выше предлагается комплексный геофизический метод для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения, первый этап которого позволяет определять пригодный для заложения скважины участок исследуемого массива с помощью георадиолокационного метода. В результате выполнения первого этапа получают радарограммы, которые анализируются на наличие осей синфазности, соответствующих зондирующим сигналам, отраженным от присутствующих в массиве механических неоднородностей. После этого создаются карты расположения неоднородностей в исследованном участке крепи с выделением областей, пригодных для бурения измерительных скважин.

Рассмотрим первый этап предлагаемого Комплексного метода более подробно, решив при этом следующие задачи, связанные с:

- определением нарушенности обделки и наличия в ней пустот;
- определением места расположения арматуры;
- выбором пригодного места для бурения измерительных скважин с целью исключения попадания в забой скважины арматуры и зон разуплотнения обделки.

Поставленные задачи решаются с помощью современного георадара SIR-3000 с комплектом антенных блоков с центральными частотами 270 МГц, 900 МГц и 2600 МГц. Описание применения георадара, его основных функций, а также преимуществ по отношению к аналогам приведены в Главе 2.

В настоящее время георадары используются в дорожном строительстве в качестве средств неразрушающего контроля [78], при проведении инженерно-геологических изысканий перед возведением зданий и сооружений [79]. В горном деле применение георадаров развито слабо, отсутствуют методические и нормативные документы, регламентирующие использование указанных приборов.

В связи со сказанным выше, предлагается порядок обнаружения различного типа неоднородностей в породном массиве с помощью метода георадиолокации.

### **3.2. Разработка методики георадиолокационного обследования железобетонной крепи подземных горных выработок на наличие в ней механических неоднородностей**

Принцип работы георадара предполагает допущение, что геосреда является однородной и не порождает отраженных сигналов, поскольку отсутствуют участки, различные по электрическим параметрам (диэлектрическая проницаемость, проводимость). Арматура и пустоты, присутствующие в железобетонной обделке, являются неоднородностями, вызывающими возникновение отраженных сигналов на границе раздела сред, которые регистрируются приемником георадара и отображаются на дисплее прибора.

Поскольку в георадаре используются щелевые антенны как для приема, так и для излучения сигналов, объединённые в один приёмо-передающий блок, расстояние между антеннами (база) не меняется в процессе измерений. При перемещении антенного блока зондирующие сигналы, отраженные от сосредоточенных неоднородностей (анкер, стержень арматуры, пустота), образуют оси синфазности на радарограмме, которые представляют собой параболические кривые – рисунок 3.1 а. Если объект распределенный (граница раздела слоев бетона) или сканирование ведется вдоль протяженной металлической арматуры, то на снимке присутствует ось синфазности в виде прямой, соответствующая границе раздела сред – рисунок 3.1 б.

Более подробно процесс формирования отраженного от неоднородностей сигнала описан в п. 2.1 Главы 2.

Георадар излучает короткие электромагнитные зондирующие радиоимпульсы (используется «ударное возбуждение» антенны [51]), причем первой излучается отрицательная полуволна, которая соответствует более темным оттенкам на радарограмме. За отрицательной следует положительная полуволна, и завершает импульс опять отрицательная полуволна [94, 95].

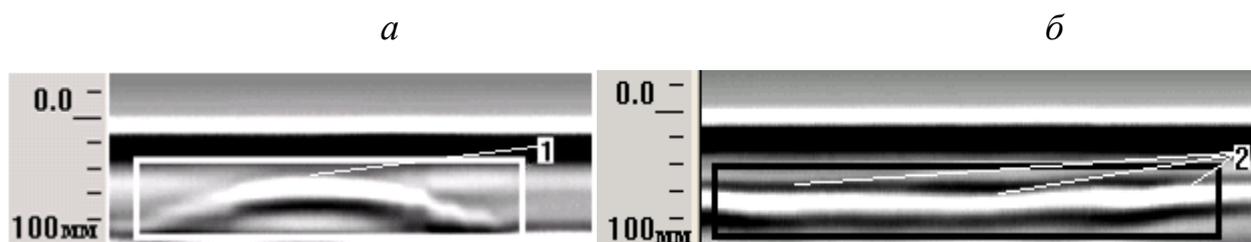


Рисунок 3.1 – Радарограммы с осями синфазности характерных неоднородностей: а – отражение зондирующего сигнала от металлического стержня 1, антенна перемещается поперек стержня; б – отражение зондирующего сигнала от границ раздела слоев «бетон – воздух»

Таким образом, прямому (неинвертированному) радиоимпульсу при выбранной цветовой схеме соответствует чередование цветов «черный-белый-черный» на радарограмме. При отражении от неоднородностей с диэлектрической проницаемостью, большей, чем у вмещающего массива (полость в бетоне, заполненная водой, увлажненный слой массива) или от металлической неоднородности (стержень арматуры, анкер), происходит отражение зондирующего радиоимпульса и фаза принимаемого сигнала изменяется на  $180^\circ$  относительно излученного, а в разрезе наблюдается чередование цветов «белый-черный-белый». В случае, когда диэлектрическая проницаемость неоднородности меньше, чем у вмещающего массива, на радарограмме наблюдается чередование цветов «черный-белый-черный» [83, 94].

Таким образом, в зависимости от электрофизических параметров неоднородностей георадар регистрирует соответствующие им сигналы, по которым можно оценить характер обнаруживаемых объектов, их геометрическую форму и глубину залегания.

В Главе 2 приведен расчет дальности георадиолокационного метода для обнаружения металлической арматуры диаметром 10 мм и 25 мм в бетоне, а также выполнено физическое моделирование процесса георадиолокационного обследования зоны контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород». По данным расчетов, пренебрегая потерями в приемной и передающей антеннах, можно обнаруживать указанную арматуру на дальностях до 3 м при частотах передатчика до 3 ГГц; такой дальности действия георадиолокационного метода вполне достаточно для решения практических задач обнаружения механических неоднородностей в железобетонных крепях и вмещающих массивах, а также для обследования зоны контакта «железобетонная крепь – массив вмещающих пород». На основе результатов физического моделирования, представленных в главе 2, предлагается методика георадиолокационного обследования участка железобетонной крепи подземной горной выработки для определения местоположения искусственных (стержни металлической арматуры, проложенные коммуникации) и естественных (пустоты, зоны разуплотнения) механических неоднородностей, а также нарушения закрепного пространства в зоне контакта «крепь – массив».

При выборе площадки, на которой планируется заложение измерительных скважин необходимо оценить, подходит ли она по техническим условиям для размещения бурового станка и бурения скважин. Для этого требуется знать, имеется ли, например, металлическая арматура в приповерхностном слое исследуемого участка обделки. Если да, то необходимо оценить ее размеры, локализацию и глубину залегания. Согласно рекомендациям в инструкции на георадар SIR-3000 [80, 94-95] с помощью высокочастотного антенного блока (2600 МГц) можно исследовать приповерхностный слой железобетонной обделки на наличие в ней металлической арматуры, пустот и зон нарушения сплошности бетона на глубинах до 400 мм. Применение антенного блока с центральной частотой 900 МГц позволит обнаруживать неоднородности, а также определять мощность обделки и состояние закрепного пространства на глубинах до 1000 мм. Антенный блок с центральной частотой 270 МГц позволяет вести обследование геосред на глубинах до 6 м.

Для повышения точности обнаружения неоднородностей полученные радарограммы анализируются на персональном компьютере с помощью программного обеспечения RADAN. На основе обработанных данных составляются карты расположения арматуры и пустот в бетоне, что позволяет отметить пригодные для бурения участки обделки.

В случае отсутствия или невозможности применения измерительного колеса или измерительной тележки георадара, которые позволяют автоматически синхронизировать снимки с рельефом местности, сканирование бетона следует проводить в режиме «Время» (соответствующее описание настроек георадара приведено в главе 2). В этом случае георадар не определяет длину пройденного антенным блоком пути. Привязку к длине профиля необходимо делать вручную, устанавливая измерительные метки через равные промежутки времени, а антенный блок перемещать с постоянной скоростью прямолинейно.

Для снижения возможных ошибок георадиолокационного обследования (регистрации сигналов, отраженных от неровностей поверхности, непостоянной скорости перемещения антенны при сканировании) и получения качественных радарограмм, перед проведением экспериментальных исследований необходимо выполнять следующие подготовительные работы:

1. очистить обследуемый участок обнажения от пыли, шелушащейся штукатурки и прочих загрязнений;
2. нанести на исследуемый участок крепко координатную сетку, используемую для равномерности проставления измерительных меток, облегчения привязки результатов измерений к реальному участку обделки и точного построения карт расположения неоднородностей;
3. приготовить шаблон карты расположения неоднородностей (на листе бумаги в масштабе нанести сетку, соответствующую установленной сетке на участке обделки).

Выполнение п. 3 необходимо для оперативного учета существующих неоднородностей в режиме «реального времени», а также в ситуациях, когда последующая

обработка радарограмм на компьютере с помощью программного продукта RADAN невозможна или является нецелесообразной.

В связи с особенностью работы используемого георадара, а также на основании результатов физического моделирования, представленных в главе 2, для наиболее точного определения пространственных координат неоднородностей и их типа, необходимо проводить обследование во взаимно перпендикулярных направлениях, а также с различной ориентацией антенного блока относительно направления перемещения (для выявления пустот и малоконтрастных объектов в исследуемой среде). Работу следует выполнять поэтапно.

### *Первый этап георадарного сканирования*

Для обнаружения участков крепи, имеющих неплотный контакт с массивом вмещающих пород, определения нарушенности приконтурного массива и выявления механических неоднородностей в глубинных областях обделки и массива горных пород, а также для оценки мощности обделки применяется антенный блок с центральной частотой 270 МГц (номинальная дальность действия 6 м).

После проведения подготовительных мероприятий, указанных выше, выполняются следующие действия:

1. Подключение к георадару антенного блока с центральной частотой 270 МГц;
2. Установка в георадаре параметров в соответствии с таблицей 3.1;
3. Георадарное сканирование участка обделки, перемещая антенный блок вдоль оси  $x$  от точки с координатами (0,0) до точки (500,0) с проставлением измерительных меток при пересечении центра антенны с вертикальной линией сетки (рисунок 3.2);
4. Фиксирование координат обнаруженных неоднородностей (осей синфазности в виде параболических кривых или прямых) на шаблоне карты расположения неоднородностей;
5. После завершения георадарного профиля верхний край антенного блока опустить на 100 мм по оси  $y$  и пройти следующий профиль;

б. Обследование участка обделки выполнять до тех пор, пока нижний край антенного блока не достигнет нижней горизонтальной линии сетки с координатой  $y = 500$  мм (рисунок 3.2).

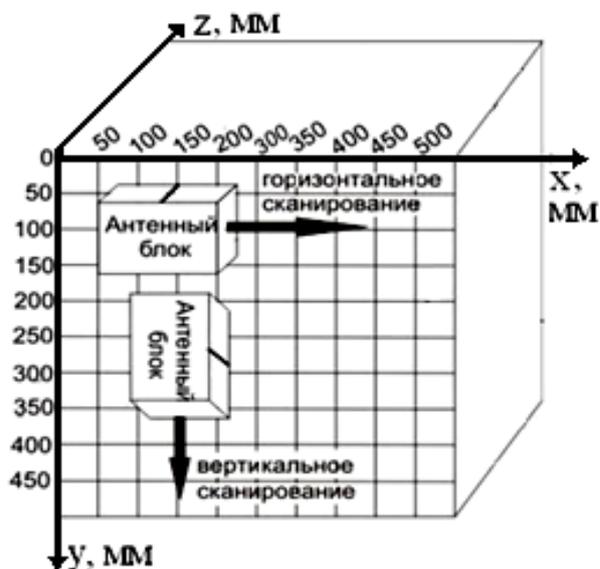


Рисунок 3.2 – Схема георадарного сканирования (горизонтального и вертикального) участка железобетонной обделки

ТАБЛИЦА 3.1 – Настройки SIR-3000 для антенного блока с центральной частотой 270 МГц

Наименование параметра	Значение
Центральная частота	270 МГц
Режим сканирования	«Время»
Количество выборок	1024
Количество бит в снимке	16
Диэлектрическая проницаемость среды	6,5
Выдержка	100 нс
Количество снимков в единицу времени	30

После завершения горизонтальных сканирований участка обделки требуется провести анализ радарограмм, определить зоны, имеющие неплотный контакт с вмещающими породами, и исключить их из дальнейшего рассмотрения.

При проведении натурных исследований значение  $\varepsilon$  следует определять экспериментально на основе сопоставления результатов георадарного обследования и контрольного бурения скважин (представлено в п. 3.3).

### *Второй этап георадарного сканирования*

Для обнаружения неоднородностей в железобетонной обделке горных выработок на глубинах до 400 мм применяется высокочастотный антенный блок с высокой разрешающей способностью (центральная частота 2600 МГц).

1. Подключение к георадару антенного блока с центральной частотой 2600 МГц;
2. Установка в георадаре параметров в соответствии с таблицей 3.2;
3. Георадарное сканирование участка обделки, перемещая антенный блок вдоль оси  $x$  от точки с координатами (0,0) до точки (500,0) с проставлением измерительных меток при пересечении центра антенны с вертикальной линией сетки (см. рисунок 3.2);
4. Фиксирование координат обнаруженных неоднородностей (осей синфазности в виде параболических кривых или прямых) на шаблоне карты расположения неоднородностей;
5. После завершения георадарного профиля верхний край антенного блока опустить на 100 мм по оси  $y$  и пройти следующий профиль;
6. Обследование участка обделки выполнять до тех пор, пока нижний край антенного блока не достигнет нижней горизонтальной линии сетки с координатой  $y = 500$  мм (см. рисунок 3.2).

ТАБЛИЦА 3.2 – Настройки SIR-3000 для антенного блока с центральной частотой 2600 МГц

<b>Наименование параметра</b>	<b>Значение</b>
Центральная частота	2600 МГц
Режим сканирования	«Время»
Количество выборок	1024
Количество бит в снимке	16
Диэлектрическая проницаемость среды	6,5
Выдержка	10 нс
Количество снимков в единицу времени	30

После завершения горизонтальных сканирований участка обделки требуется провести анализ радарограмм. Это позволяет определять места нахождения механических неоднородностей и выделить участки массива для повторного георадарного

обследования с целью уточнения координат этих объектов и оценкой их типов и форм.

Затем провести вертикальное сканирование (схема сканирования представлена на рисунке 3.2): антенный блок перемещается вдоль оси  $y$  от точки с координатами  $(0,0)$  до точки  $(0,450)$ , измерительные метки проставляются при пересечении середины антенного блока с каждой горизонтальной линией сетки. После завершения вертикального профиля антенный блок перемещается на 100 мм вправо по оси  $x$  и указанные выше действия повторяются. Сканирование проводится до тех пор, пока правый край антенного блока не достигнет вертикальной линии сетки, соответствующей координате  $x = 500$  мм.

### *Третий этап георадарного сканирования*

Используется для оценки мощности обделки, состояния закрепного пространства, выявления зон разуплотнения между крепью и массивом, а также для оценки механического контакта «крепь – массив». Для этих целей следует применять антенный блок с более низкой центральной частотой – 900 МГц.

Этот антенный блок подключается к георадару, после чего выполняется настройка прибора в соответствии с таблицей 3.3.

Сканирование следует проводить в соответствии с представленным выше порядком для антенного блока с центральной частотой 2600 МГц.

После выполнения отмеченных выше трех этапов сканирования, проводится анализ натуральных радарограмм, а при необходимости их обработка в программе RADAN.

ТАБЛИЦА 3.3 – Настройки георадара SIR-3000 для антенного блока с центральной частотой 900 МГц

<b>Наименование параметра</b>	<b>Значение</b>
Центральная частота	900 МГц
Режим сканирования	«Время»
Количество выборок	1024
Количество бит в снимке	16
Диэлектрическая проницаемость среды	6,5
Выдержка	25нс
Количество снимков в единицу времени	30

По цветовой маркировке радарограмм на дисплее прибора (принятых и отраженных сигналов) можно судить об электрических свойствах отражающего материала. Для верификации работоспособности предлагаемой методики в реальных условиях проведен натурный эксперимент на одном из горных предприятий Красноярского края.

### **3.3. Апробация методики георадиолокационного обследования в реальных условиях горного производства**

С помощью георадиолокационного метода была обследована сплошная железобетонная крепь трех подземных выработок и даны рекомендации по выбору мест, наиболее подходящих для проходки измерительных скважин геомеханического контроля. Георадиолокационное обследование выполнялось в соответствии с предложенной в п. 3.2 настоящей главы методикой георадиолокационного обследования железобетонной обделки подземных горных выработок на наличие в ней механических неоднородностей.

Выработки располагаются в области с величинами главных напряжений, обусловленных весом налегающего породного массива. Вмещающие породы представлены в основном, гнейсами. Выработки представляют собой камеры с арочным сводом. Используется монолитная железобетонная крепь по всему контуру выработок.

Первое сооружение располагается в ненарушенном массиве вмещающих пород, второе – полностью находится в зоне дробления, а часть третьего – в зоне расслоения вмещающих пород.

Георадиолокационное обследование железобетонной обделки проводилось в условиях ограниченного пространства и недостаточной освещенности. Проектная мощность обделки составляет 0,5-2,5 метров.

Радарограммы обрабатывались с помощью программного обеспечения RADAN, после чего были составлены карты мест расположения арматуры, пустот и

зон разуплотнения бетона отделки вдоль обследуемого участка. Это позволило дать рекомендации по местам, наиболее подходящим для бурения измерительных скважин геомеханического контроля. На всех радарограммах по оси  $x$  откладывалось расстояние, пройденное антенным блоком при обследовании, в мм, а по оси  $z$  – глубина проникновения зондирующего сигнала в исследуемый участок отделки, в мм.

### *Экспериментальное определение значения диэлектрической проницаемости бетона*

Как было отмечено во второй главе, точность результатов георадиолокационного обследования существенно зависит от соответствия диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon$ ), установленной в настройках георадара, реальному значению  $\varepsilon$  бетона. Поэтому перед проведением георадиолокационного обследования следует экспериментально определять значение диэлектрической проницаемости бетона крепи.

Для этого в первой выработке перед проведением георадарного обследования была пройдена контрольная скважина диаметром 112 мм. На глубине 70 мм в забой попал вертикальный металлический стержень диаметром 25 мм. За вертикальным стержнем металлической арматуры находились 2 горизонтальных стержня диаметром 10 мм каждый. На участке отделки, прилегающем к скважине, проводилось георадарное сканирование (рисунок 3.3 а). Здесь обнаружена горизонтально расположенная арматура. Радарограмма, представленная на рисунке 3.3 б, содержит участки 5 и 6, соответствующие отражению зондирующего сигнала от горизонтальных металлических стержней.

При сопоставлении результатов бурения с волновой структурой радарограмм определялось также значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , характерное для бетона крепи данной выработки. Для этого использовалось известное соотношение:

$$H = v_{cp}t, \quad (3.1)$$

где  $H$  – глубина залегания арматуры – определена по результатам бурения,  $v_{cp}$  – скорость распространения зондирующего электромагнитного импульса в бетоне,  $t$  – время распространения сигнала, регистрируемое георадаром.

Скорость распространения электромагнитной волны в исследуемой среде определяется выражением [73, 85]:

$$v_{cp} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (3.2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, а  $\varepsilon$ ,  $\mu$  соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемость среды распространения.

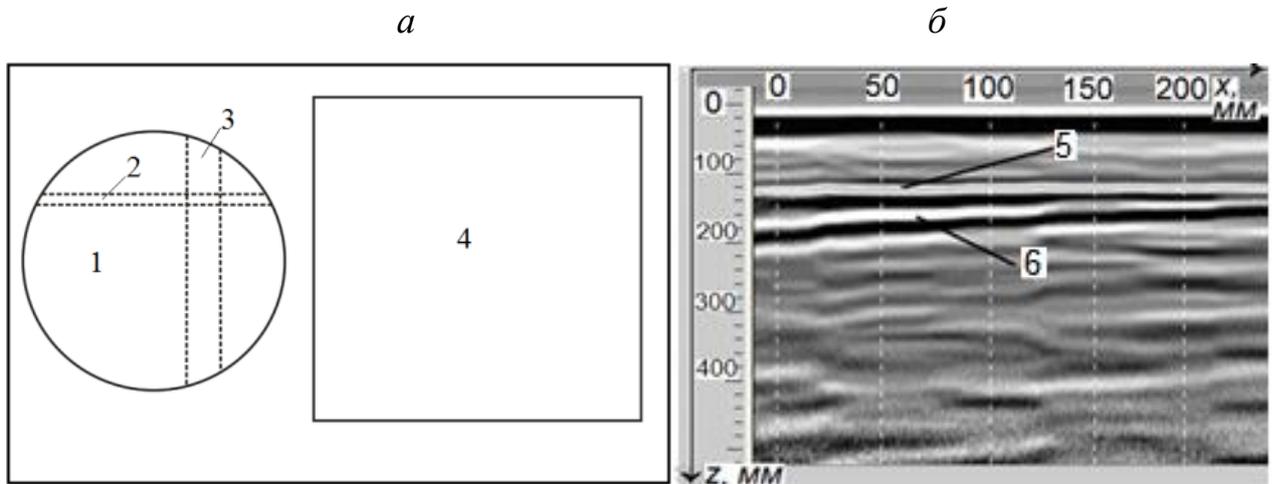


Рисунок 3.3 – Пояснение к экспериментальному определению диэлектрической проницаемости бетона: а – исследуемый участок отделки: 1 – скважина диаметром 112 мм; 2 – горизонтальная арматура диаметром 10 мм; 3 – вертикальная арматура диаметром 25 мм; 4 – область георадарного сканирования; б – радарограмма, полученная по результатам георадарного сканирования участка отделки первой выработки, рядом с пробной скважиной: 5, 6 – оси синфазности, соответствующие отраженным от горизонтально расположенных стержней арматуры зондирующим сигналам

Принимая магнитную проницаемость равной единице, а также с учетом (3.1) и (3.2), имеем для определения диэлектрической проницаемости бетона простое выражение:

$$\varepsilon = \left(\frac{ct}{H}\right)^2, \quad (3.3)$$

В соответствии с выражением (3.3) получено экспериментальное значение  $\varepsilon = 6,25$ . Оно в дальнейшем было использовано для настройки георадара при обследовании остальных выработок, так как условия эксплуатации указанных сооружений резко не отличаются, а, следовательно, электрофизические свойства геоматериалов можно считать сопоставимыми.

### 3.4. Обработка и анализ результатов натурального эксперимента

После георадиолокационного обследования обделки трех выработок, обработки радарограмм в программе RADAN и их последующего анализа, были построены карты мест локализации механических неоднородностей в обделке.

Рассмотрим характерные радарограммы для каждой выработки с анализом отраженных сигналов.

Радарограммы, полученные в результате георадарного сканирования левого свода второй выработки, представлены на рисунках 3.4 – 3.7.

На рисунке 3.4 представлена радарограмма, полученная с помощью антенного блока с центральной частотой 270 МГц. Ее детальная обработка показала, что на глубине около 2500 мм зарегистрирована ось синфазности 3, соответствующая отражению зондирующего сигнала от протяженной границы раздела сред, что соответствует неплотному контакту «железобетон – массив вмещающих пород», а цифрами 1, 2 отмечены оси синфазности зондирующего сигнала, соответствующие отражениям от неоднородной структуры бетона обделки (рисунок 3.4 а). Данный участок крепи был исключен из дальнейшего рассмотрения и признан непригодным для проведения инструментальных измерений.

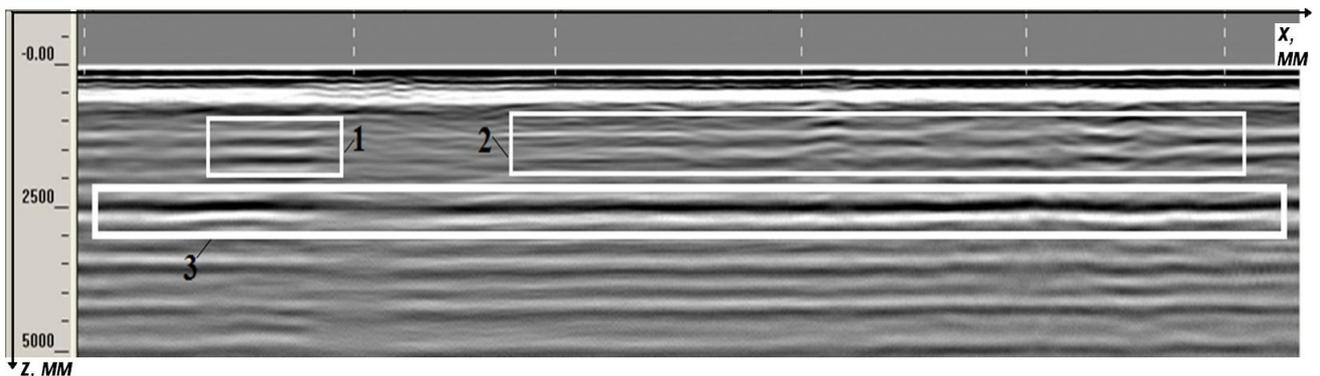


Рисунок 3.4 – Радарограмма участка свода слева, вторая выработка, антенный блок с центральной частотой 270 МГц

На рисунке 3.5 а наблюдаются три оси синфазности параболического вида (кривые 1), идентифицирующие металлическую арматуру на глубине 90 мм. Ниже на глубине 120 мм располагается ось синфазности 2, соответствующая металличе-

скому стержню арматуры (антенна, по существу, перемещается параллельно стержню).

По результатам обработки и анализа всех радарограмм, полученных с помощью антенны с центральной частотой 2600 МГц, построена обобщенная карта зон локализации механических неоднородностей, представленная на рисунке 3.5 в виде соответствующей схемы.

Данный рисунок представляет собой разрез исследуемого участка обделки фронтальной плоскостью. По оси  $x$  откладывается ширина сканируемого участка в мм, по оси  $y$  – длина, в мм.

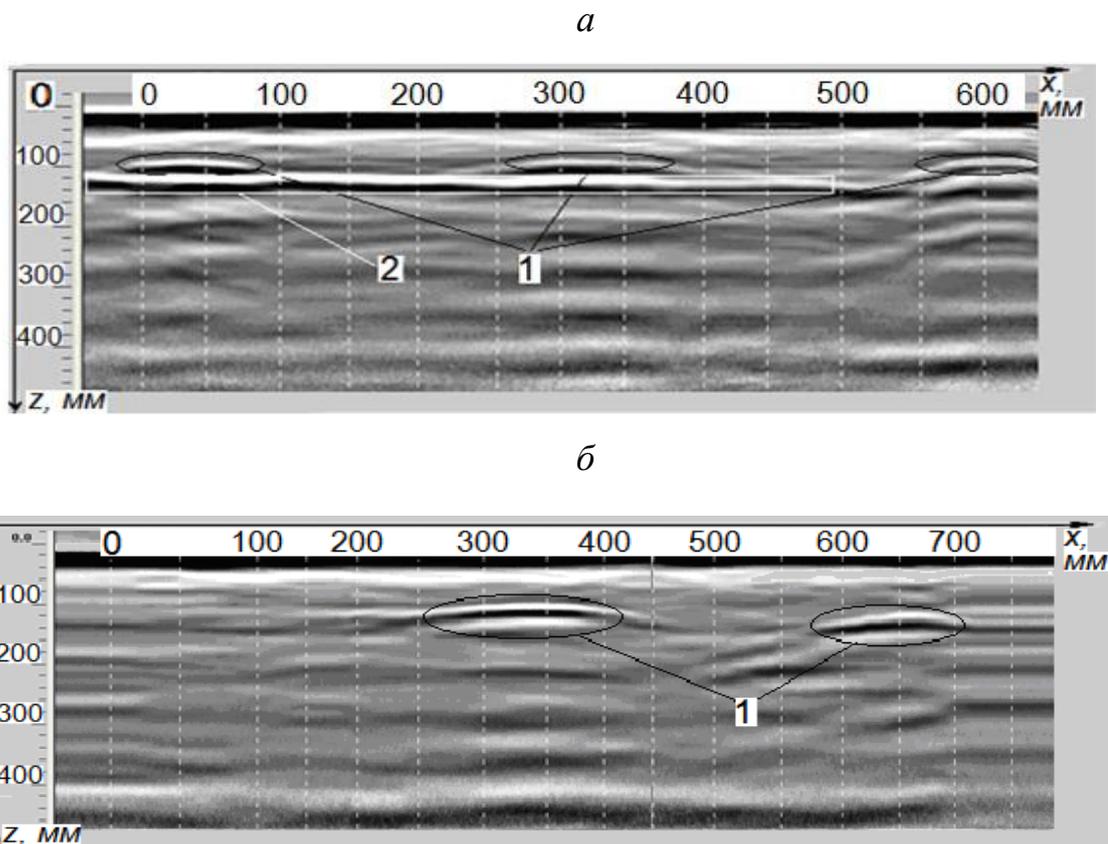


Рисунок 3.5 – Радарограмма второй выработки, свод слева, антенный блок с центральной частотой 2600 МГц: а – горизонтальное сканирование; б – вертикальное сканирование

Согласно приведенной на рисунке 3.6 схеме, зоны, обозначенные римскими цифрами I-IV, подходят для бурения измерительных скважин, поскольку не содержат на глубине до 400 мм арматуры и значительных по размерам включений в виде пустот. Арабскими цифрами обозначены зоны на обследованном участке крепи с

обнаруженными стержнями арматуры. Стержни 1, 2, 3 находятся на глубине от 90 до 100 мм, а 4, 5 – на глубине 100-120 мм.

Для выявления арматуры в зонах предполагаемого бурения I – IV для анализа глубин до 1000 мм применялась антенна с центральной частотой 900 МГц.

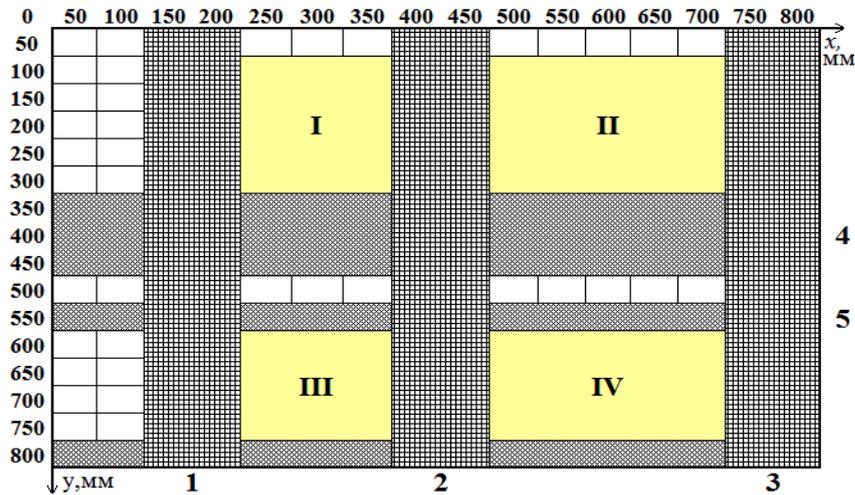


Рисунок 3.6 – Схема зон расположения арматуры для второй выработки, свод слева. 1-5 – участки локализации металлической арматуры, I-IV – участки, пригодные для бурения измерительных скважин

Для определения шага армирования железобетонной крепи выполнен анализ радарограммы, представленной на рисунке 3.7, полученной с помощью антенного блока с центральной частотой 2600 МГц, при георадарном сканировании вдоль всего обследуемого свода. Оси синфазности отраженного зондирующего сигнала в виде парабол 1 соответствуют расположенной в приповерхностном слое железобетона обделки металлической арматуры, залегающей на глубине около 50-80 мм.

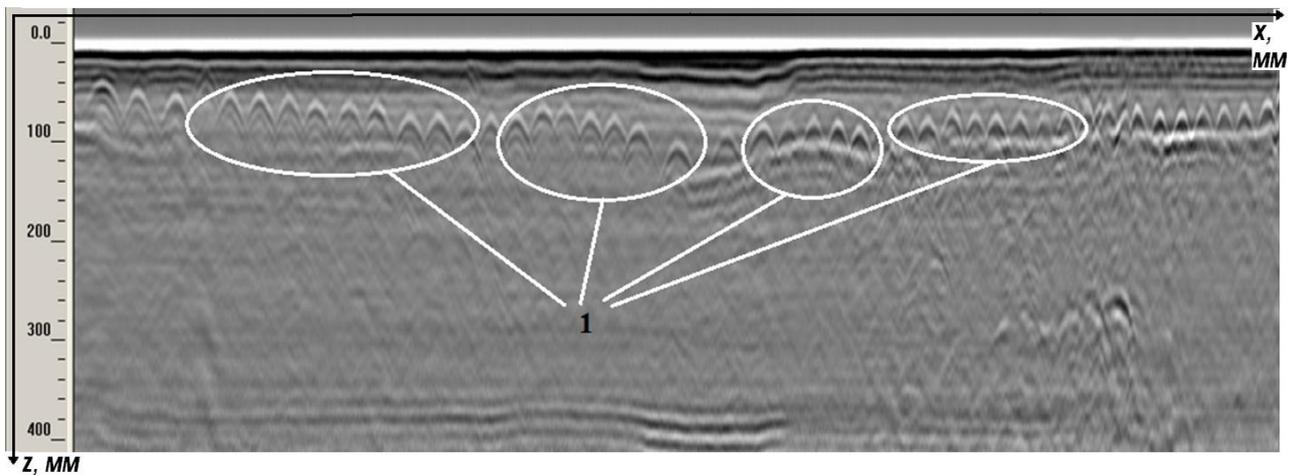


Рисунок 3.7 – Радарограмма участка свода слева, вторая выработка, антенный блок с центральной частотой 270 МГц

Рассмотрим теперь волновую структуру радарограмм, полученных при обследовании участка обделки антенным блоком с центральной частотой 900 МГц и представленную на рисунке 3.8.

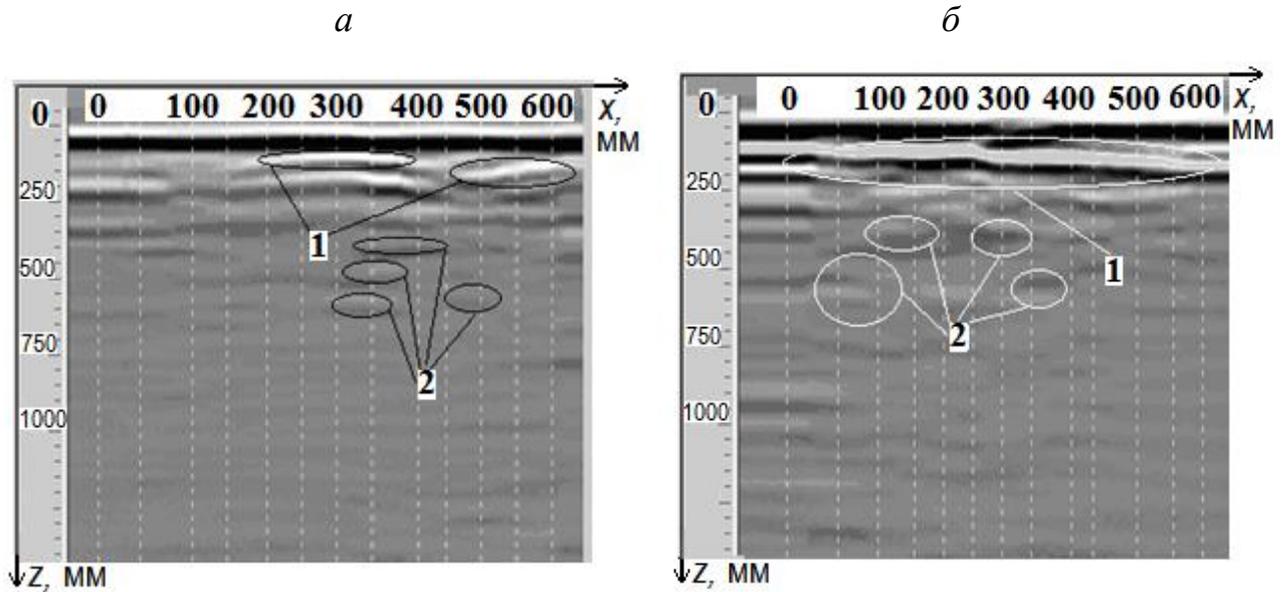


Рисунок 3.8 – Радарограммы второй выработки, свод слева, антенный блок с центральной частотой 900 МГц: а – вертикальное сканирование; б – горизонтальное сканирование; 1 – оси синфазности, соответствующие металлической арматуре, 2 – оси синфазности, соответствующие пустотам или наполнителю бетона.

На рисунке 3.8 а видны две оси синфазности параболического вида (кривые 1). Они соответствуют горизонтальным стержням арматуры 4 и 5 на рисунке 3.6. Глубже данной арматуры присутствуют небольшие пустоты или наполнитель бетона (размерами не более  $50 \times 50$  мм), что подтверждается наличием осей синфазности 2. Рисунок 3.8 б представляет радарограмму горизонтального сканирования. Здесь ось синфазности – прямая 1 – соответствует горизонтальной арматуре 5 на рисунке 3.6, оси синфазности, обозначенные цифрой 2 соответствуют пустотам.

На глубинах от 400 до 1000 мм металлической арматуры и признаков разуплотнения бетона на участках II и IV не обнаружено. Таким образом, они оцениваются как пригодные для бурения измерительных скважин.

Рассмотрим результаты георадиолокационного обследования правого свода второй выработки. Они представлены на рисунках 3.9, 3.10.

На рисунке 3.9 а зарегистрированы оси синфазности 1, соответствующие отражениям зондирующего сигнала от металлических протяжённых неоднородностей на глубине 100-120 мм, а на рисунке 3.9 б – от металлической арматуры на глубине порядка 100 мм. Здесь присутствует значительное количество отраженных волн от пустот и слабо отличающихся от бетона по диэлектрической проницаемости иных неоднородностей.

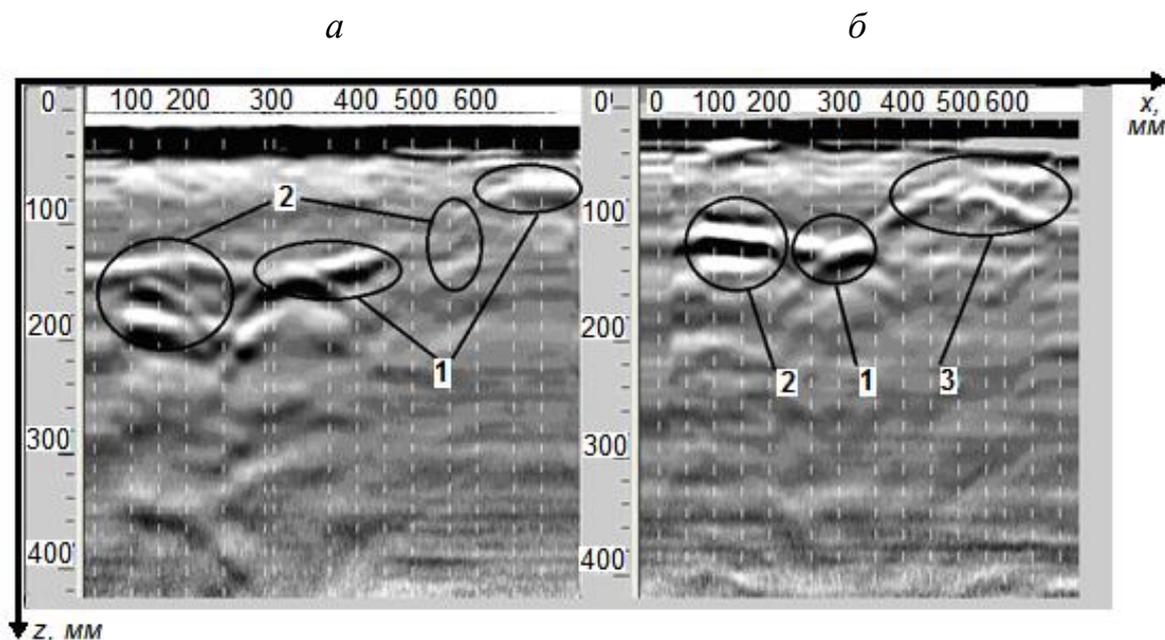


Рисунок 3.9 – Радарограммы второй выработки, свод справа, горизонтальное сканирование, антенный блок с центральной частотой 2600 МГц; оси синфазности, соответствующие металлической арматуре (1) (предположительно, анкер и металлический стержень справа вверху); зона нарушения сплошности (2) бетона –пустоты; глухое увлажненное отверстие (3) на поверхности выработки и зона нарушения сплошности бетона крепи

На радарограммах, полученных с помощью двух антенных блоков видны множественные переотражения зондирующего сигнала от неоднородностей обследуемой отделки. Совместно с присутствующими в верхних слоях металлическими неоднородностями в виде арматуры, имеют место отражения от неоднородностей с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , меньшей, чем у бетона (темные кривые параболического вида и прямые) – то есть от пустот или наполнителя бетона – рисунки 3.9 и 3.10.

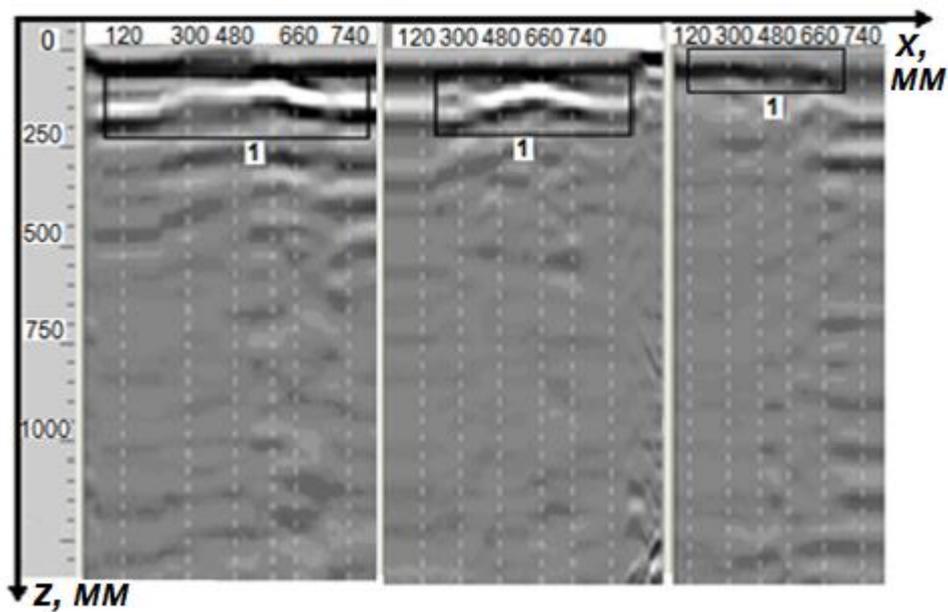
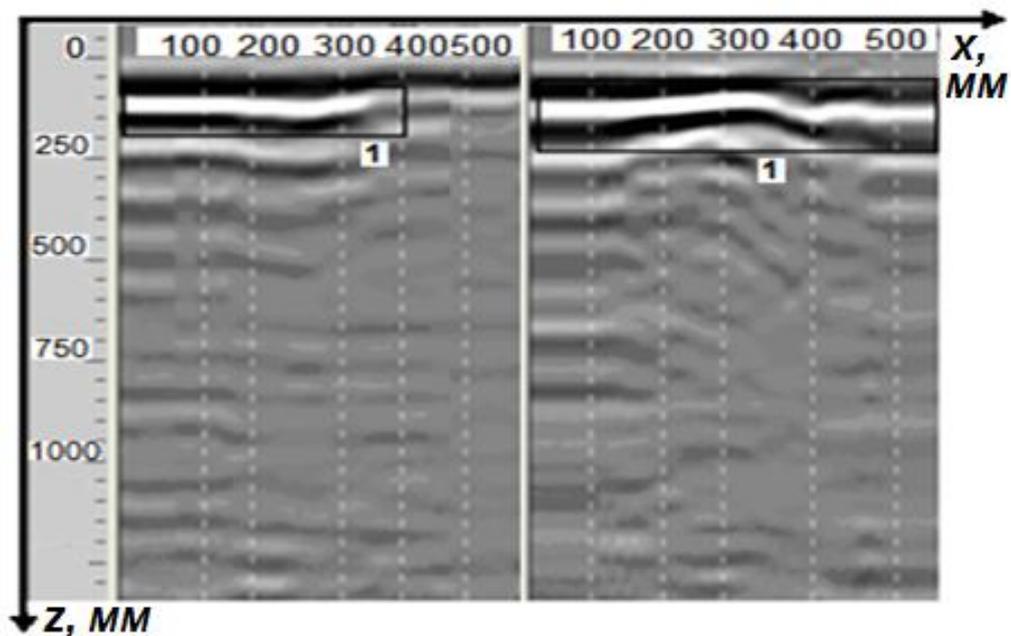


Рисунок 3.10 – Радарограммы второй выработки: свод справа, антенный блок с центральной частотой 900 МГц: а – горизонтальное сканирование; б – вертикальное сканирование; 1 – оси синфазности, соответствующие отражениям зондирующего сигнала от металлических неоднородностей

На рисунке 3.11 представлены сводные результаты интерпретации данных георадиолокационного обследования в виде карты вдоль второй выработки (свод справа) с указанием мест нахождения механических неоднородностей.

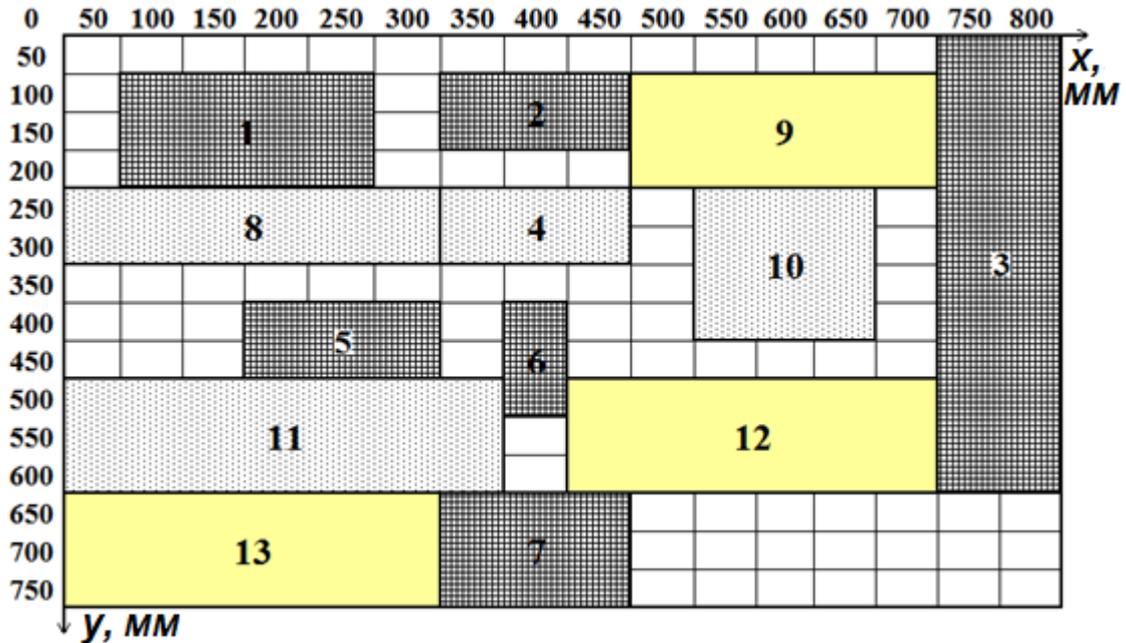


Рисунок 3.11 – Карта расположения арматуры для второй выработки (свод справа): 1-3, 5-7 металлические неоднородности; 4, 8, 10, 11 – зоны нарушения сплошности бетона; 9, 12, 13 – зоны, пригодные для бурения измерительных скважин.

Таким образом, обследование правого свода второй выработки позволяет сделать выводы о том, что бетонная обделка имеет неоднородную структуру с наличием множества пустот или твердых породных включений в виде заполнителя бетона. На данном участке выработки применена комбинация из анкерной и железобетонной крепи, поскольку обнаруженные металлические неоднородности имеют в большинстве своем локализованный характер. Так, неоднородность 2 представляет собой анкер, нижняя часть которого видна на поверхности обделки; 2, 5, 6, 7 – металлические неоднородности (возможно, анкеры). Они находятся у самой поверхности обделки (глубина залеганий от 90 до 140 мм). Неоднородности 1 и 3 представляют собой части стержней горизонтальной и вертикальной арматуры. Неоднородности 4, 8, 10, 11 являются местами с сильными нарушениями сплошности бетона (по сути – пустотами). Неоднородность 10 – это отверстие, из которого при проведении исследований сочилась вода. Следовательно, области 9, 12, 13 являются пригодными для

бурения измерительных скважин, поскольку здесь не обнаружено неоднородностей на дальности до 1000 мм.

На рисунках 3.12, 3.13 представлены радарограммы обделки для третьей выработки.

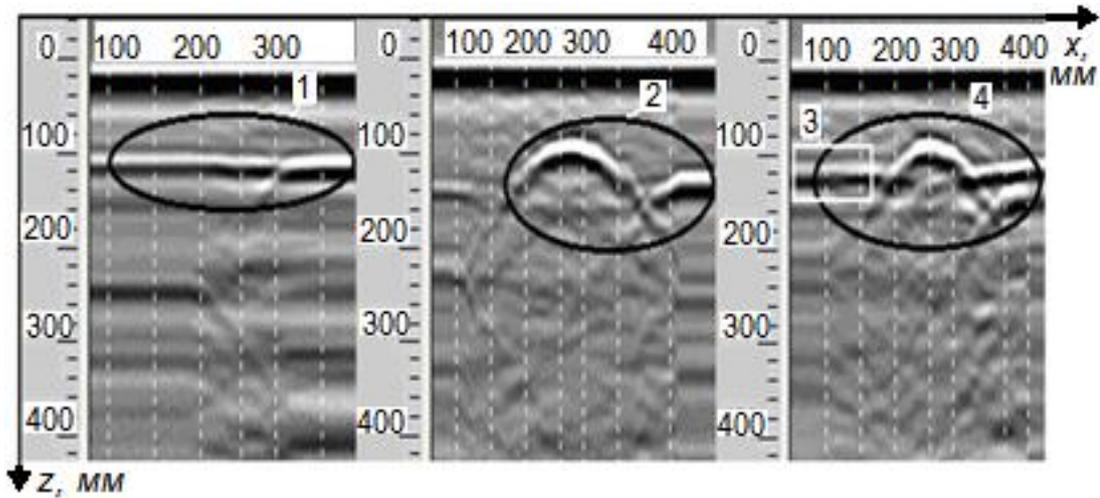


Рисунок 3.12 – Радарограммы третьей выработки, горизонтальное сканирование антенным блоком с центральной частотой 2600 МГц: 1, 3 – стержень горизонтальной арматуры на глубине 100 мм; 2, 4 – стержень вертикальной арматуры на глубине 80 мм

Из рисунка 3.12 в следует, что вертикальная арматура находится на глубине 80 мм, а ниже ее располагается горизонтальный стержень арматуры на глубине 110 мм. Глубже арматуры видны многочисленные переотражения сигнала от материала обделки с нарушениями сплошности – пустоты или наполнитель бетона.

Радарограммы, полученные при сканировании того же участка обделки третьей выработки антенным блоком с центральной частотой 900 МГц представлены на рисунке 3.13.

В верхней части радарограмм присутствуют оси синфазности – светлые прямые, соответствующие арматуре в приповерхностном слое, обнаруженной при помощи антенного блока с центральной частотой 2600 МГц. Эллипсами выделены оси синфазности, соответствующие отраженным от металлических неоднородностей зондирующим сигналам. Арматура в виде вертикальных и горизонтальных стержней располагается на глубинах 450 и 500 мм.

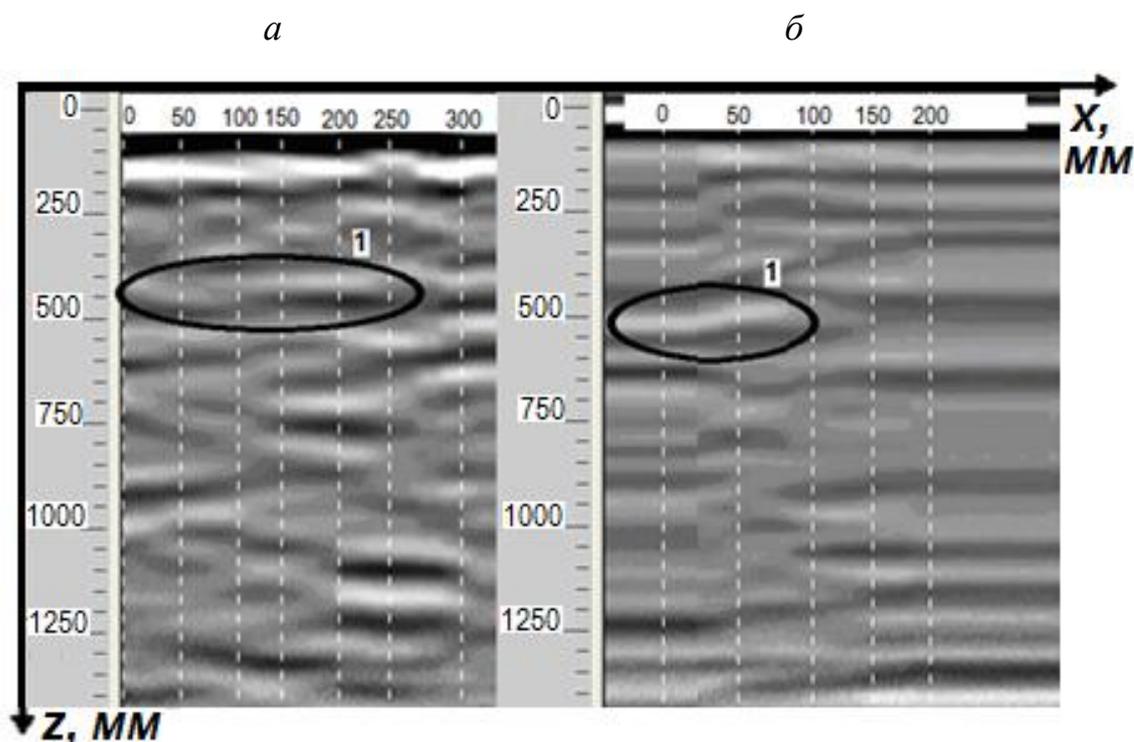


Рисунок 3.13 – Радарограммы при вертикальном (а) и горизонтальном (б) сканировании третьей выработки, полученные с помощью антенного блока с центральной частотой 900 МГц: 1 – оси синфазности, соответствующие отраженным от металлических неоднородностей зондирующим сигналам

После георадиолокационного обследования участка обделки третьей выработки было проведено контрольное бурение измерительной скважины. Результаты бурения подтвердили нахождение арматуры на глубине 450 и 500 мм.

Результаты георадарных сканирований в виде соответствующей карты-схемы расположения неоднородностей на участке обделки третьей выработки приведены на рисунке 3.14. Место бурения скважины отмечено цифрой 7 на рисунке 3.14.

Согласно приведенным здесь сведениям, арматура в областях 1-3 находится на глубине от 80 до 90 мм, а в областях 4,5 – на глубине от 100 до 110 мм. Стержни металлической арматуры 6 находятся на глубине 450-500 мм. Это подтверждается результатами контрольного бурения. В бетоне присутствуют пустоты, но их значительно меньше, чем во второй выработке справа.

Результаты представленных натуральных наблюдений и методика георадиолокационного обследования опубликованы в [97, 98].

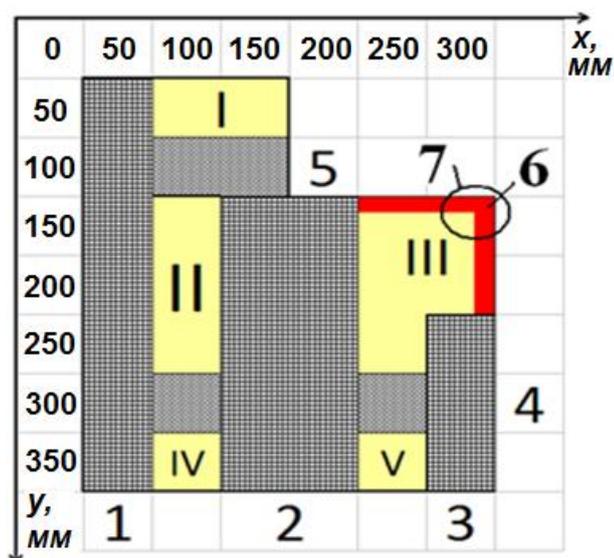


Рисунок 3.14 – Карта-схема расположения арматуры на обследуемом участке, третьей выработки: 1-6 – металлическая арматура; 7 – контрольная скважина; зоны I-V пригодны для проходки измерительных скважин.

Диссертантом, совместно с Е.В. Денисовой, были проведены исследования возможности использования георадара SIR-3000 при бестраншейных технологиях прокладки подземных коммуникаций [99]. На основании данных исследований был апробирован первый этап Комплексного метода при работе в грунтовых массивах. После анализа радарограмм была построена карта расположения механических неоднородностей (рисунок 3.15), присутствующих на обследованном участке грунта. На данной карте отмечена зона, не содержащая крупных механических неоднородностей, наиболее пригодная для проходки горизонтальной скважины.

Были проведены опытно-промышленные испытания разработанной методики георадиолокационного обследования – перед проходкой горизонтальной скважины при прокладке подземных коммуникаций бестраншейным способом с помощью указанной методики был обследован участок грунта, вдоль которого предполагалось пройти скважину. Результаты георадиолокационного обследования участка грунтового массива позволили выбрать место расположения входного приемка и направление проходки скважины, вдоль которого отсутствовали механические неоднородности. Акт опытно-промышленных испытаний разработанной методики георадиолокационного обследования и сама методика представлены в Приложении Г.

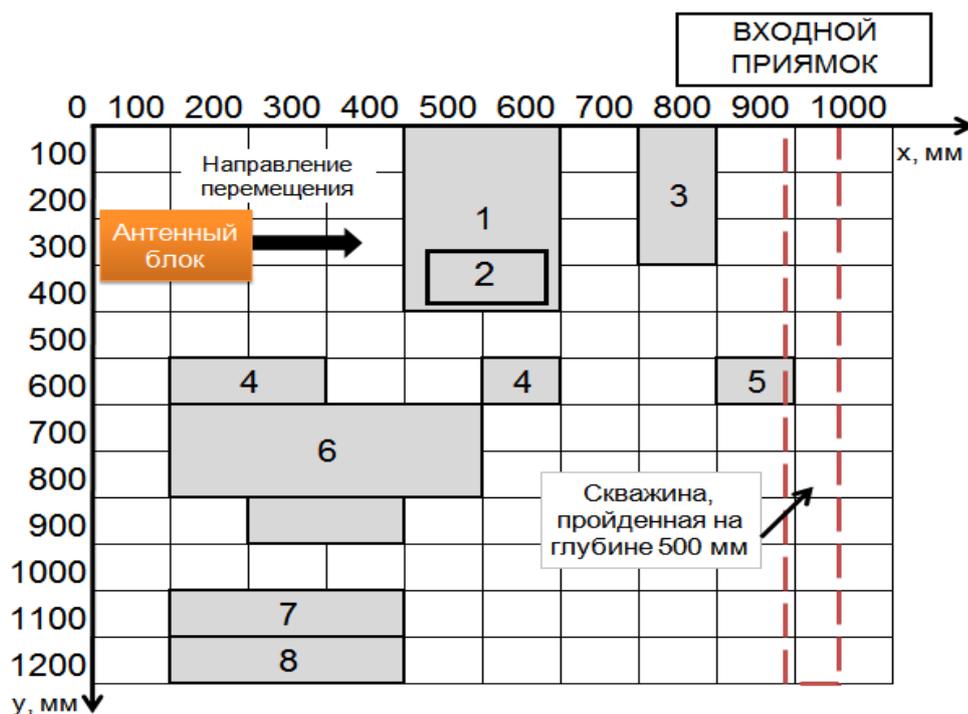


Рисунок 3.15 – Карта расположения неоднородностей на участке грунтового массива: 1 – неоднородность на глубине 300 мм; 2 – неоднородность на глубине 520 мм; 3 – металлический стержень на глубине 50 мм; 4 – мелкие породные включения на глубине 220 мм; 5 – пустотелая область или породное включение с  $\epsilon$  меньшей, чем у грунта на глубине 280 мм; 6 – массивная неоднородность – камень на глубине 500 мм; 7,8 – массивная неоднородность – камень

Область 7 на рисунке 3.15 располагается на глубине 380 мм, а 8 – на глубине 240 мм.

На основании изложенного в данной главе материала сформулировано второе научное положение: *разработанная методика обследования участка железобетонной крети георадиолокационным методом позволяет выбирать места заложения измерительных скважин геомеханического контроля на основе 2D карт локализации обнаруженных механических неоднородностей, построенных по результатам георадарного обследования и анализа волновой структуры полученных радарограмм.*

## Выводы

Таким образом, натурными экспериментами по проверке возможности применения первого этапа комплексного геофизического метода для выбора места зало-

жения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения – георадиолокационного обследования – для обнаружения различного типа механических неоднородностей в железобетонной обделке капитальных горных выработок доказано, что:

1. Точность определения глубины нахождения арматуры в железобетонной крепи подземных горных выработок существенно зависит от соответствия реальной диэлектрической проницаемости обследуемой геосреды ( $\epsilon$ ), значению  $\epsilon$  программно задаваемому в качестве одного из исходных параметров работы георадара. Для условий выполненного натурного эксперимента значение  $\epsilon$  бетона железобетонной крепи принималось равным 6,25 (в соответствии со значением, полученным в результате сопоставления радарограмм с данными бурения в первой камере);

2. Применение георадиолокационного метода позволяет выделять механически неоднородные участки на глубине до 400 мм при использовании антенного блока с центральной частотой 2600 МГц. Для более глубинного обследования необходимо применять антенные блоки с более низкой частотой. Антенный блок с центральной частотой 900 МГц позволяет выявлять механические неоднородности на глубинах до 1000 мм;

3. Для определения пустот и нарушенности закрепного пространства в зоне контакта «крепь – массив», а также мощности обделки подземных горных выработок необходимо применять более низкочастотные антенные блоки (с центральной частотой 270 МГц).

4. Расположение механических неоднородностей в одной вертикальной плоскости на разных глубинах затрудняет обнаружение более удалённых от поверхности объектов вплоть до полной невозможности их выявления, что обусловлено значительным ослаблением мощности проходящего зондирующего сигнала за счет отражения от более близких неоднородностей и общим затуханием электромагнитных волн, распространяющихся в геосредах.

В целом, экспериментальными исследованиями доказано, что методом георадиолокации можно определять наличие механических неоднородностей на подлежащих обследованию участках железобетонной крепи для обоснованного выбора

мест, пригодных для бурения скважин геомеханических измерений в условиях подземных горных выработок.

В следующей главе будут рассмотрена проблема контроля процесса бурения измерительных скважин геомеханического контроля, что позволит регистрировать отклонение рабочего органа буровой машины от требуемой траектории движения, а следовательно, фиксировать начало искривления ствола скважины. Оперативный контроль процесса бурения скважины позволяет принимать меры по корректировке траектории движения рабочего органа буровой машины.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН**

Как отмечалось в главе 1, наиболее точные результаты определения абсолютных напряжений, действующих в массиве горных пород и в железобетонной крепи подземных сооружений, дают скважинные геомеханические методы частичной разгрузки, возмущения, параллельных скважин и т.д. При использовании данных методов протяженность скважин меняется от сотен миллиметров до нескольких метров – в зависимости от мощности исследуемого массива и целей измерений. Достоверность результатов оценки НДС указанными методами напрямую зависит от качества проходки измерительных скважин, поскольку попадание в створ скважины механических неоднородностей различного типа часто приводит к искажению измеренных данных экспериментов, а также к искривлению ее ствола. Это предъявляет особые требования как к размещению измерительного оборудования, так и к проведению исследований в целом. Таким образом, контроль процесса бурения измерительных скважин для измерения НДС породных массивов в окрестности подземных горных выработок с креплением является актуальной задачей.

Рассмотренный в главах 2 и 3 метод георадиолокации не позволяет определять координаты рабочего органа буровой машины в режиме реального времени и не обеспечивает требуемой дальности действия при достаточной для контроля процесса бурения измерительных скважин разрешающей способности. Более эффективно обозначенная проблема может быть решена с помощью акустических методов. Рассмотрим существующие системы определения координат рабочих органов буровых машин, которые используются в настоящее время.

Российской промышленностью не производятся породоразрушающие машины с управляемыми рабочими органами, поскольку отсутствуют необходимые отечественные системы навигации для их работы [100]. Имеющиеся зарубежные системы (Mark, Eclipse и т.п. [58-61]), применяемые в установках горизонтального направ-

ленного бурения, основаны на использовании искусственных излучателей, интегрируемых в рабочий орган буровой машины. Это значительно снижает срок службы таких систем из-за постоянного воздействия на них тепловых и механических (в том числе, ударных) нагрузок. Кроме того, ремонт и обслуживание подобных буровых установок требует дополнительных финансовых и временных затрат.

В процессе проходки скважины рабочий орган как породоразрушающее устройство сталкивается с механическими неоднородностями разной крепости, зонами с различной плотностью пород вплоть до попадания в пустоты, что вызывает его отклонение от заданной траектории движения. При этом, с увеличением глубины бурения, отклонение скважины от расчётного направления значительно возрастает.

Следовательно, вопросы надежного оперативного контроля процесса проходки измерительных скважин, в том числе развития методов и систем определения координат рабочих органов буровых машин в режиме реального времени являются актуальными.

В данной главе будет рассмотрен второй этап Комплексного метода. Он заключается в определении пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия на основе вычисления времен задержки прихода акустического сигнала от рабочего органа в процессе проходки скважины – на вход многоканальной акустической измерительной системы, расположенной на поверхности обнажения массива, относительно опорного акустического сигнала непосредственно с рабочего органа.

#### **4.1. Разработка алгоритма и основанного на нем технического средства для определения пространственных координат ударного породоразрушающего инструмента**

Воздействие рабочего органа буровой машины ударного действия на массив порождает импульсные акустические сигналы большой мощности и одинаковой

скважности. Такое воздействие на породный массив схоже, в известной мере, с возникновением в нем таких событий как, например, горный удар. В связи с этим, представленный в п. 1.4 главы 1 метод определения пространственных координат источника импульсного акустического сигнала можно адаптировать к решению задачи контроля положения ударного породоразрушающего инструмента в породном массиве.

Сущность предлагаемого алгоритма заключается в регистрации времени вступления акустического сигнала, создаваемого рабочим органом буровой машины ударного действия в процессе её движения в породном массиве, в приёмные каналы измерительной системы относительно опорного сигнала, поступающего непосредственно с машины. Координаты источника акустического сигнала вычисляются путем решения соответствующей системы уравнений.

Обычно, точность существующих систем контроля геомеханических процессов не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к точности определения координат буровой машины в массиве. Это обусловлено способом распределенного построения системы, состоящей из нескольких каналов, разнесенных в пространстве и объединенных между собой интерфейсом связи (см. рисунок 1.12). При распространении упругой волны от источника до акустоэлектрических датчиков, преобразователь, до которого сигнал дошел первым, посылает по интерфейсу связи другим преобразователям команду на запуск измерения времен задержки прихода упругой волны. Из-за задержки, возникающей между моментом прихода упругой волны на первый сработавший преобразователь и моментом запуска других датчиков, появляется погрешность определения координат, из-за которой не удается достичь необходимой точности измерительной системы в целом.

В разработанной диссертантом измерительной системе обработка информации с акустоэлектрических преобразователей объединена в одном устройстве. Это позволяет избежать возникновения временных задержек, появляющихся при отправке управляющей команды по проводному интерфейсу от одного приемного канала к другим для измерения времен задержки прихода упругой волны. Это позволит увеличить точность работы измерительной системы. Так же точность такого метода

можно повысить за счет использования акустического сигнала непосредственно с самого рабочего органа буровой машины в качестве задающего для последующего вычисления времен задержки акустических сигналов на поверхность обнажения. Это невозможно конструктивно осуществить, если источником акустического сигнала является, например, горный удар.

Структурная схема технического средства (рисунок 4.1), принцип работы которого основан на предложенном автором алгоритме вычисления пространственных координат, состоит из излучателя 1 импульсного акустического сигнала (далее излучатель 1) – рабочего органа буровой машины ударного действия,  $N$  акустоэлектрических преобразователей  $2_1 \dots 2_N$ ,  $N$  блоков  $3_1 \dots 3_N$  обработки импульсного акустического сигнала, каждый из которых содержит соответственно один из усилителей  $4_1 \dots 4_N$  напряжения, один из фильтров  $5_1 \dots 5_N$  нижних частот, один из аналого-цифровых преобразователей  $6_1 \dots 6_N$  и один из цифровых фильтров  $7_1 \dots 7_N$  нижних частот, блока 8 вычисления трехмерных координат работающей буровой машины, блока 9 отображения информации.

Количество  $N$  акустоэлектрических преобразователей  $2_1 \dots 2_N$  равно количеству блоков  $3_1 \dots 3_N$  обработки импульсного акустического сигнала и должно быть не менее четырех, так как один акустоэлектрический преобразователь, на который сигнал с излучателя 1 приходит первым, используется как опорный, то есть определяющий время начала отсчета, а остальные акустоэлектрические преобразователи используются для определения  $N-1$  времен запаздывания импульсного акустического сигнала относительно времени начала отсчета и для последующего вычисления усредненных значений трех координат блоком 8 вычисления пространственных координат. В качестве излучателя 1 используется рабочий орган буровой машины ударного действия, с которым соединен вход акустоэлектрического преобразователя.

Использование более четырех акустоэлектрических преобразователей  $2_1 \dots 2_N$  позволяет повысить точность измерителя координат работающей буровой машины за счет получения дополнительных данных и вычисления усредненных значений скорости  $V$  распространения упругих волн в грунте и трех координат машины.

Работа устройства для пяти акустоэлектрических преобразователей  $2_1 \dots 2_5$  осуществляется следующим образом. Акустоэлектрические преобразователи  $2_1 \dots 2_4$  устанавливаются на поверхности грунта в вершинах воображаемого прямоугольника  $ABCD$  (рисунок 4.2) следующим образом – акустоэлектрический преобразователь  $2_4$  в точке  $A$ , акустоэлектрический преобразователь  $2_1$  в точке  $B$ , акустоэлектрический преобразователь  $2_2$  в точке  $C$ , а акустоэлектрический преобразователь  $2_3$  в точке  $D$ . Акустоэлектрический преобразователь  $2_5$  устанавливается на самом излучателе 1 в точке  $O$ .

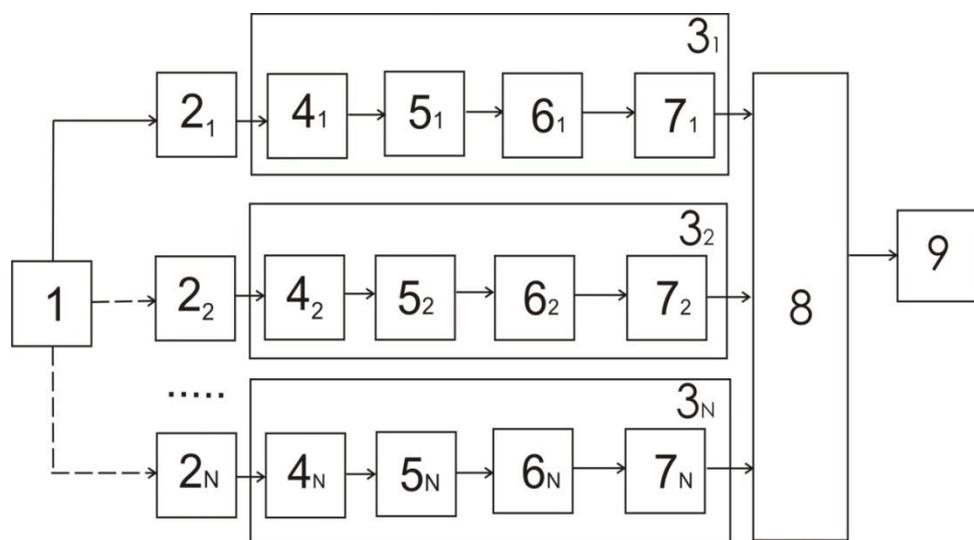


Рисунок 4.1 – Структурная схема многоканальной акустической измерительной системы для определения пространственных координат буровой машины ударного действия: 1 – акустический излучатель (рабочий орган буровой машины);  $2_1-2_N$  – акустоэлектрические преобразователи;  $3_1-3_N$  – блоки обработки импульсного акустического сигнала;  $4_1-4_N$  – усилители;  $5_1-5_N$  – фильтр нижних частот;  $6_1-6_N$  – аналого-цифровой преобразователь;  $7_1-7_N$  – цифровой фильтр; 8 – блок вычисления пространственных координат; 9 – устройство отображения информации

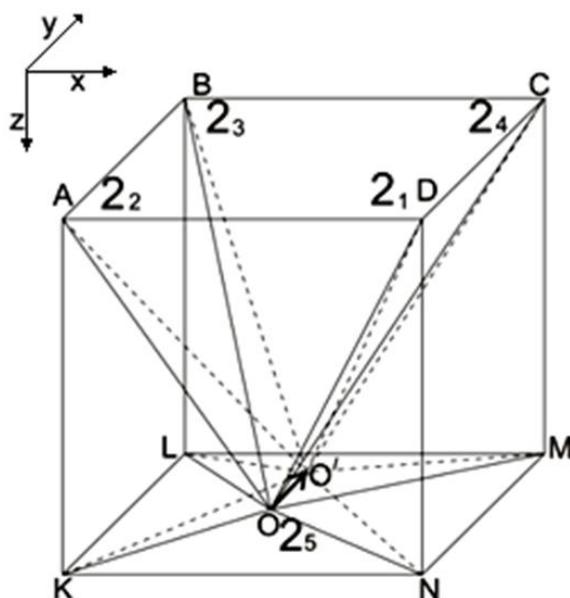


Рисунок 4.2 – Схема взаимодействия источника удара с акустоэлектрическими преобразователями

Перед началом работы производят калибровку устройства – вычисляют скорость  $V$  распространения упругих волн в породном массиве. Зная исходные координаты рабочего органа буровой машины, по временам  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки прихода акустического импульса в точки  $A, B, C, D$  для каждого из блоков  $3_2...3_5$  обработки импульсного акустического сигнала в блоке 8 вычисления пространственных координат машины вычисляют четыре скорости  $V_A, V_B, V_C, V_D$  распространения упругих волн в породном массиве, что позволяет учесть возможную неоднородность его свойств.

Для предотвращения наложения спектров усиленных сигналов, подаваемых на вход аналого-цифровых преобразователей  $6_1...6_5$ , они должны быть пропущены через фильтры  $5_1...5_5$  нижних частот для подавления спектральных компонент импульсного акустического сигнала, частота которых превышает половину частоты дискретизации. После фильтрации производится оцифровка сигналов при помощи аналого-цифровых преобразователей  $6_1...6_5$ .

Далее посредством цифровых фильтров  $7_1...7_5$  нижних частот из оцифрованных сигналов выделяют частоты, лежащие в полосе полезного сигнала, создаваемого движением буровой машины в породном массиве.

Полученные цифровые сигналы со всех блоков  $3_1...3_5$  обработки импульсного акустического сигнала системы поступают на соответствующие входы блока 8 вычисления пространственных координат машины, которые далее отображаются для оператора системы при помощи блока 9 отображения информации.

Блок 8 вычисления пространственных координат машины работает по принципу определения времен задержки  $t_A, t_B, t_C, t_D$  поступления импульсного акустического сигнала от излучателя 1 до акустоэлектрических преобразователей  $2_1...2_5$ . При этом один из акустоэлектрических преобразователей  $2_1...2_5$  будет опорным. Относительно этого сигнала вычисляют времена задержки  $t_A, t_B, t_C, t_D$  прихода сигнала до других акустоэлектрических преобразователей  $2_1...2_4$ . В данном случае опорным сигналом является сигнал от излучателя 1, то есть от рабочего органа буровой машины ударного действия, он первым приходит на акустоэлектрический преобразователь  $2_5$ , который размещен на самом излучателе 1 (рабочем органе).

Далее вычисляют три координаты излучателя 1 в блоке 8 вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины следующим образом [101].

За исходные данные для вычисления координат излучателя 1 используют расстояния между акустоэлектрическими преобразователями  $2_1...2_4$ :

$a$  – расстояние между акустоэлектрическими преобразователями  $2_1$  и  $2_4$ , которое равно расстоянию между акустоэлектрическими преобразователями  $2_2$  и  $2_3$ :  
 $AD=BC$ ;

$b$  – расстояние между акустоэлектрическими преобразователями  $2_2$  и  $2_1$ , которое равно расстоянию между акустоэлектрическими преобразователями  $2_3$  и  $2_4$ :  
 $AB=CD$ ;

$h$  – глубина запуска равна расстоянию  $AK$ ;

$l$  – длина машины, начало ее координат принято в точке  $A$ ;

$t_0$  – время прихода опорного сигнала на акустоэлектрический преобразователь  $2_5$  (для вычислений принимают равным 0);

$t_A, t_B, t_C, t_D$  – времена задержек распространения импульсного акустического сигнала в точках  $A, B, C, D$  соответственно относительно опорного сигнала.

При заглаблении рабочего органа в породный массив на всю длину  $l$  координаты точки  $O$ , где формируется импульсный акустический сигнал, относительно начала координат на рисунке 4.2 будут равны:  $x = \frac{a}{2}, z = h, y = l$ . Зная эти координаты, находят значения скоростей  $V_A, V_B, V_C, V_D$  распространения импульсного акустического сигнала до каждого акустоэлектрического преобразователя  $2_1 \dots 2_4$  из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (OA)^2 = x^2 + y^2 + z^2, \\ (OB)^2 = x^2 + (a - y)^2 + z^2, \\ (OC)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2, \\ (OD)^2 = (b - x)^2 + y^2 + z^2; \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_A = OA / t_A, \\ V_B = OB / t_B, \\ V_C = OC / t_C, \\ V_D = OD / t_D. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Далее, после ударного воздействия излучателя 1 на массив, происходит перемещение точки  $O$ , где формируется импульсный акустический сигнал, в точку  $O'$  удара. По известным скоростям  $V_A, V_B, V_C, V_D$  распространения упругих волн в породном массиве и временам  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки их поступления в приемные каналы средства измерения вычисляют расстояния от точки  $O'$  удара до акустоэлектрических преобразователей  $2_1 \dots 2_4$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} O'A = V_A \cdot t_A, \\ O'B = V_B \cdot t_B, \\ O'C = V_C \cdot t_C, \\ O'D = V_D \cdot t_D. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

После этого определяют координаты излучателя 1 из системы уравнений:

$$(O'A)^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (4.3)$$

$$(O'B)^2 = x^2 + (a - y)^2 + z^2, \quad (4.4)$$

$$(O'C)^2 = (b - x)^2 + (a - y)^2 + z^2, \quad (4.5)$$

$$(O'D)^2 = (b - x)^2 + y^2 + z^2. \quad (4.6)$$

Из каждых трех уравнений последовательно вычисляют три искомые координаты.

Например, из уравнений (4.3), (4.4) и (4.6) получают:

$$\begin{cases} x = \frac{(O'A)^2 - (O'D)^2 + b^2}{2b}, \\ y = \frac{(O'A)^2 - (O'B)^2 + a^2}{2a}, \\ z = \sqrt{(O'A)^2 - y^2 - x^2}. \end{cases} \quad (4.7)$$

Аналогичным образом проводят вычисления и для систем уравнений (4.3, 4.4, 4.5), (4.4, 4.5, 4.6), (4.3, 4.5, 4.6). В итоге получают 4 набора результатов  $(x_1, y_1, z_1) \dots (x_4, y_4, z_4)$ , по которым определяют средние арифметические значения трех координат рабочего органа буровой машины ударного действия:

$$\begin{cases} x = \frac{x_1 + \dots + x_4}{4}, \\ y = \frac{y_1 + \dots + y_4}{4}, \\ z = \frac{z_1 + \dots + z_4}{4}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Таким образом, в блоке 9 отображения информации должны визуально отображаться данные о пространственных координатах машины в режиме реального времени.

Времена  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки поступления импульсного акустического сигнала в акустоэлектрические преобразователи  $2_1 \dots 2_{N-1}$  относительно опорного сигнала могут быть вычислены как разность между моментом регистрации сигнала в приемном канале измерительной системы и моментом регистрации опорного сигнала.

При этом момент регистрации поступления сигнала в приемный канал может фиксироваться, исходя из разных критериев.

(1) *Регистрация момента поступления сигнала при превышении его амплитудного значения заданного порога.*

В этом случае моментом регистрации поступления сигнала считается такое значение времени, когда уровень абсолютного значения сигнала соответствующего акустоэлектрического преобразователя  $2_1 \dots 2_{N-1}$  превысил установленное пороговое значение. Недостатком такого критерия является низкая точность определения времен  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки из-за высокого уровня шума в полосе полезного сигнала и,

как следствие этого, требуется большая величина порогового значения. Но при этом критерий работает даже при сильных искажениях сигнала, обусловленных возможным присутствием в геосреде механических неоднородностей.

*(2) Регистрация момента поступления сигнала при достижении определенного уровня его амплитудного значения.*

В этом случае моментом регистрации поступления сигнала считается такое значение времени, когда уровень абсолютного значения сигнала соответствующего акустоэлектрического преобразователя  $2_1 \dots 2_{N-1}$  принимает заданный уровень от своего амплитудного значения. На точность данного критерия оказывает влияние искажение формы сигнала вследствие дисперсии скоростей распространения упругих волн в геосреде либо наличия в последней различного типа неоднородностей, что в свою очередь приводит к ошибкам вычисления времен  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки. Точность по сравнению с первым критерием вычисления времен  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки распространения импульсного акустического сигнала повышается за счет снижения вероятности работы устройства в полосе шумов.

*(3) Вычисление времен  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержек распространения импульсного акустического сигнала по сдвигу максимума взаимной корреляционной функции сигналов.*

В критерии (3) вычисляют взаимные корреляционные функции между опорным сигналом и сигналами, зарегистрированными другими акустоэлектрическими преобразователями  $2_1 \dots 2_{N-1}$ . После этого вычисляют время смещения максимумов функций взаимной корреляции (являющихся, по сути, автокорреляционными, так как сигналы во всех приемниках представляют собой один и тот же сигнал, пришедший с разной задержкой) относительно нуля, что будет соответствовать значениям времен  $t_A, t_B, t_C, t_D$  задержки поступления соответствующих сигналов в акустоэлектрические преобразователи  $2_1 \dots 2_{N-1}$  относительно опорного сигнала. На точность критерия влияют искажения формы сигнала вследствие дисперсии скоростей распространения упругих волн в геосреде, либо наличия в ней возможных неоднородностей, которые приводят к ошибкам вычисления указанных времен задержки. Данный метод обеспечивает наибольшую из всех рассмотренных точность определения

времен  $t_A$ ,  $t_B$ ,  $t_C$ ,  $t_D$  задержек, однако требование обеспечения минимальных искажений формы обрабатываемых сигналов ограничивает его применимость.

В связи с тем, что обработка сигнала ведется в цифровом виде, возможно использование одновременно нескольких методов вычисления времен  $t_A$ ,  $t_B$ ,  $t_C$ ,  $t_D$  задержки распространения импульсного акустического сигнала, что в целом повысит точность определения пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия.

Апробация предложенного алгоритма вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия (далее по тексту – Алгоритм) выполнена на примере проходки горизонтальных скважин пневмоударной машиной в грунтовом массиве. Ниже представлены результаты натуральных испытаний применимости разработанного диссертантом Алгоритма.

## **4.2. Апробация алгоритма в натуральных условиях.**

### **Выбор измерительной аппаратуры**

Для проверки целесообразности применения предложенного выше Алгоритма, а также предварительной оценки его точности, был выполнен натуральный эксперимент по регистрации моментов поступления акустических импульсных сигналов, создаваемых на поверхности земли движущейся в грунте пневмоударной машиной, в приемные каналы средства измерения и последующего вычисления времен задержки их поступления относительно момента прихода опорного акустического сигнала непосредственно с машины с использованием современного многоканального измерительного комплекса PULSE [101, 102]. При этом отклонение пневмоударной машины влево и вправо от заданной траектории движения имитировалось перемещением приемных каналов средства измерения вправо и влево соответственно. Пояснения имитации отклонения пневмоударной машины от заданной траектории движения даны на рисунке 4.3: отсутствие отклонения от требуемой траектории

движения (рисунок 4.3 а), отклонение вправо (рисунок 4.3 б) и отклонение влево (рисунок 4.3 в).

Экспериментальные исследования проводились на полигоне «Зеленая горка» ИГД СО РАН. Вблизи места проведения исследований отсутствуют высоковольтные сети, а так же другие подземные коммуникации.

Создавался входной приямок, в который помещалась пневмоударная машина «Тайфун-2» (габаритные размеры: длина 550 мм, диаметр 40 мм; энергия удара 22 Дж) на глубине 500 мм.

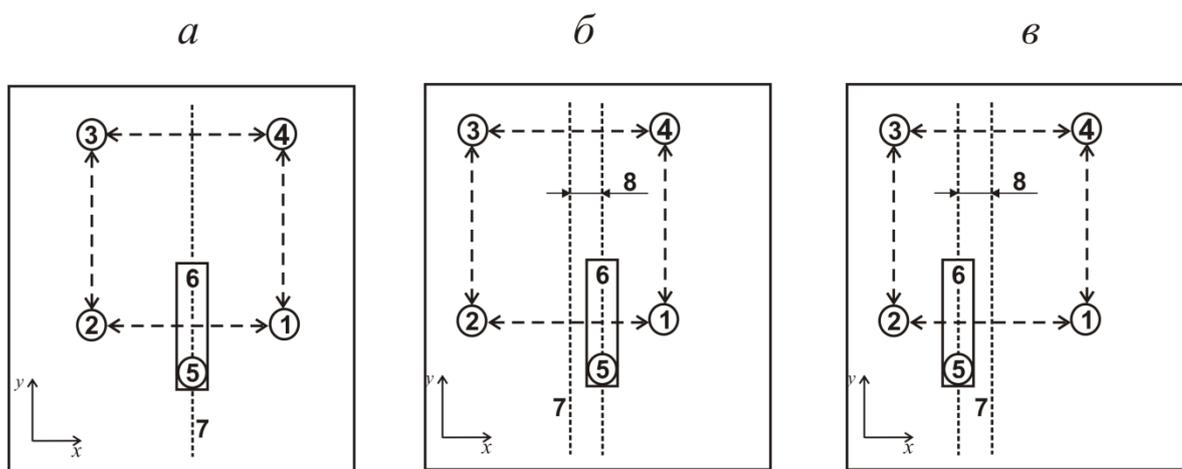


Рисунок 4.3 – Пояснения имитации отклонения пневмоударной машины от заданной траектории движения: 1-5 – акселерометры KD29; 6 – рабочий орган пневмоударной машины; 7 – требуемая траектория движения; 8 – величина отклонения рабочего органа от траектории движения

Геосреда, в которой проводились экспериментальные исследования, представляет собой суглинок с влажностью 22% и плотностью  $1,74 \text{ г/см}^3$ . Верхний слой геосреды (около 200 мм от поверхности земли) содержит твердые породные включения диаметрами до 40 мм; на глубине от 200 до 700 мм геосреда однородна и не содержит видимых слоистых структур.

Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 4.4.

Для регистрации времен задержки акустических сигналов, создаваемых движением пневмоударной машины в грунтовом массиве на поверхности земли, относительно акустического сигнала непосредственно с самой машины, был выбран многоканальный комплекс для анализа акустических сигналов PULSE, выпускаемый фирмой Брюль и Кьер (Германия). Описание комплекса приведено в Приложении Б.

В этой модульной многоканальной системе совмещены такие возможности, как мощь современного анализатора, использующего технику быстрого преобразования Фурье, и широкие вычислительные возможности персональной ЭВМ [102].

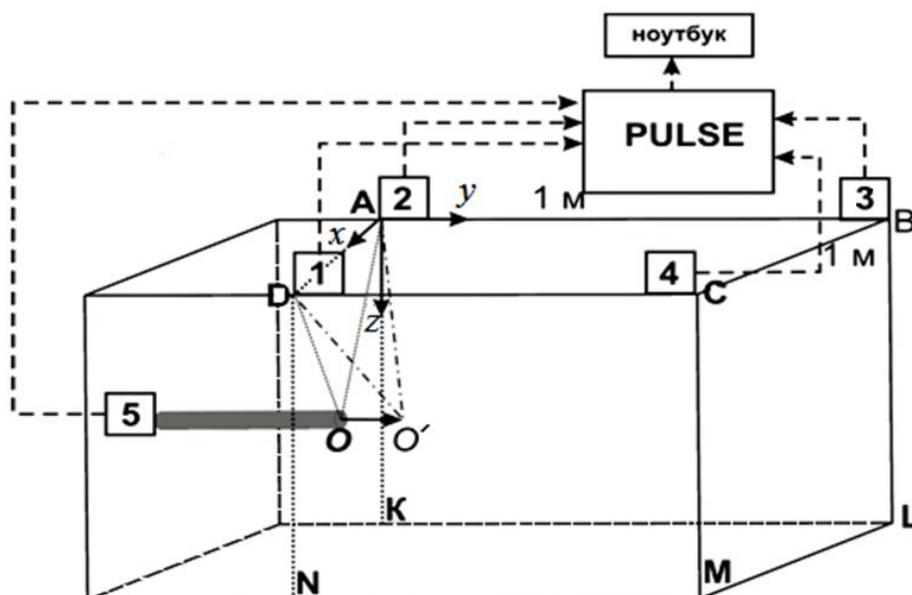


Рисунок 4.4 – Схема проведения эксперимента по вычислению времен задержки акустического сигнала, создаваемого движением буровой машины в породном массиве (при  $y = 0$ ); 1-5 – акселерометры KD29

При проведении натурального эксперимента для исключения амплитудных ошибок поддерживалось постоянное давление подаваемого для работы пневмоударной машины воздуха, осуществлялись постоянные замеры расстояния, на которое работающая машина заглублялась в грунтовый массив.

Крепление каждого акселерометра на поверхности земли осуществлялось в соответствии с [103] на шпильку.

Пример записи акустического сигнала с одного из пяти каналов представлен на рисунке 4.5.

Обработка данных по времени задержки импульсного акустического сигнала, создаваемого ударным воздействием при движении пневмоударной машины в грунтовом массиве, относительно акустического сигнала, пришедшего непосредственно с машины, осуществлялась с использованием программного обеспечения Pulse Lab-Shop Version 10.1.

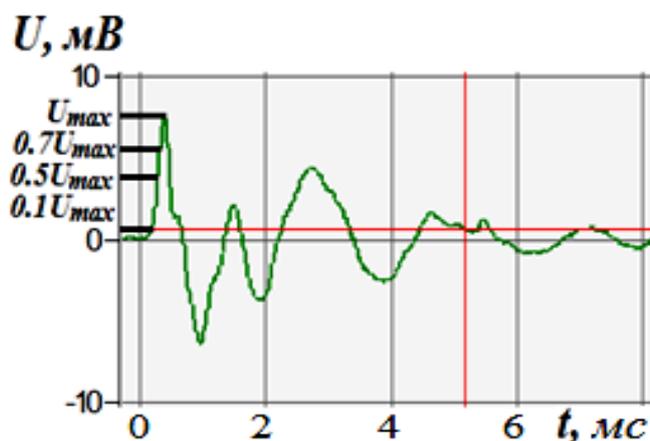


Рисунок 4.5 – Пример записи акустического сигнала, создаваемого ударом буровой машины

Из серии записанных в процессе движения пневмоударной машины акустических сигналов для каждого канала выбиралось  $N$  импульсов с одинаковыми порядковыми номерами, исключая при этом из анализа те акустические импульсы, которые соответствуют началу и концу процесса бурения. На рисунке 4.6 представлено окно программы для обработки данных. Красным цветом выделен один из акустических импульсов, выбранный для последующего анализа.

Обработка полученной в экспериментах информации для повышения точности определения скорости распространения упругих волн в грунте производилась по нарастающему фронту первого импульса.

Был реализован следующий алгоритм обработки данных: по началу прихода упругого импульса (при превышении им уровня шумов). Порог регистрации в данном случае принимался равным  $0,1 \cdot U_{max}$ ;  $0,5 \cdot U_{max}$  и  $0,7 \cdot U_{max}$ , где  $U_{max}$  – амплитудное значение фиксируемой характеристики сигнала.

Поскольку регистрация акустического сигнала непосредственно с пневмоударной машины осуществлялась путем размещения акселерометра  $2_5$  на магните, прикрепленном к металлическому стержню, который в свою очередь соединялся с задней гайкой рабочего органа пневмоударной машины, при расчетах учитывалось время, за которое акустический сигнал перемещается на расстояние, равное сумме длин рабочего органа и металлического стержня (расчетное значение 140 мкс). Расстояние между приемными каналами оставалось постоянным и равным 1 м.

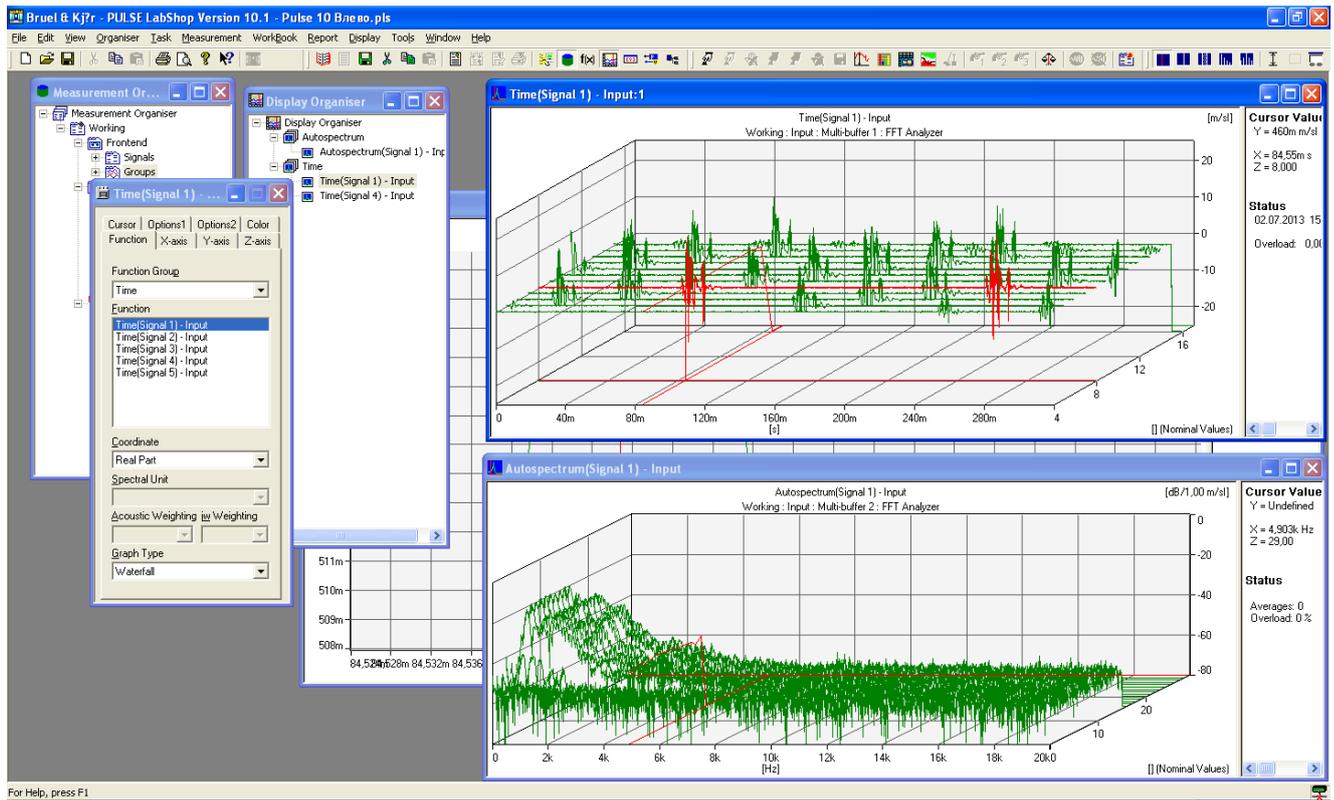


Рисунок 4.6 – Окно программы Pulse LabShop Version 10.1

Результаты вычисленных времен задержки для четырех приемных каналов относительно пятого (подключенного непосредственно к пневмоударной машине) приведены в приложении В в таблице В.1. Значения рассчитанных скоростей распространения упругих волн в грунтовом массиве с использованием алгоритма, представленного в п. 4.2 (выражение (4.1)), приведены в таблице В.2. В таблице 4.1 представлены пространственные координаты породоразрушающей машины (выражение (4.7)), вычисленные на основании времен задержки распространения акустического сигнала в грунтовом массиве, представленных в таблице В.1.

Повысить точность измерения скорости распространения акустического сигнала в грунте можно, если располагать акустоэлектрические преобразователи таким образом, чтобы буровой снаряд находился в центре между ними. Теоретически, при прохождении упругими волнами равных расстояний влияние неучитываемых породных включений на скорость распространения волн должно снижаться. Однако, данное утверждение нуждается в экспериментальной проверке, которая выполнена в

п. 4.4. В таблице 4.1 представлен результат расчетов пространственных координат пневмоударной машины в грунте по алгоритму, представленному в п. 4.2.

Абсолютная погрешность измерений вычислялась по формуле [92]:

$$\Delta = x_P - x_{II}, \quad (4.9)$$

где  $x_P$  – результат измерений;  $x_{II}$  – истинное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность измерений оценивалась по формуле [92]:

$$\delta = \frac{x_P - x_{II}}{x_{II}} \cdot 100\%. \quad (4.10)$$

ТАБЛИЦА 4.1 – Расчетные значения пространственных координат машины ( $y = 0$ )

Величина и направление отклонения машины, м	Реальные значения координат, м			Расчетные значения координат машины при обработке сигнала по уровню $0,1 \cdot U_{max}$ , м			Расчетные значения координат машины при обработке сигнала по уровню $0,5 \cdot U_{max}$ , м			Расчетные значения координат машины при обработке сигнала по уровню $0,7 \cdot U_{max}$ , м		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0,1 влево	0,4	0	0,5	0,116	0,074	—	0,307	0,024	0,478	0,318	0,021	0,476
0,2 влево	0,3	0	0,5	0,011	0,215	0,430	0,187	0,088	0,561	0,154	0,079	0,561
0,1 вправо	0,6	0	0,5	—	—	—	0,706	0,057	0,532	0,680	0,048	0,515
0,2 вправо	0,7	0	0,5	—	—	—	0,954	0,022	0,449	0,917	0,022	0,432
Абсолютная погрешность, м (относительная погрешность, %)												
Величина и направление отклонения машины, м	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0,1 влево	—	—	—	0,093 (23,25)	0,024	0,022 (4,40)	0,082 (20,50)	0,021	0,024 (4,80)	—	—	—
0,2 влево	—	—	—	0,113 (37,66)	0,088	0,061 (12,20)	0,146 (48,66)	0,079	0,061 (12,20)	—	—	—
0,1 вправо	—	—	—	0,106 (17,66)	0,057	0,032 (6,40)	0,08 (13,33)	0,048	0,015 (3,00)	—	—	—
0,2 вправо	—	—	—	0,254 (36,28)	0,022	0,051 (10,20)	0,217 (31,00)	0,022	0,068 (13,60)	—	—	—

Анализ данных таблицы 4.1 для пространственных координат машины по вычисленным временам задержки поступления акустического импульсного сигнала, создаваемого движущейся в грунтовой массе пневмоударной машиной, в приемные каналы средства измерения относительно момента поступления сигнала непосредственно с самой машины показал, что наибольшая точность определения пространственных координат рабочего органа пневмоударной машины достигается для координат  $y$  и  $z$  при величине отклонения машины от заданной траектории движения не более чем на 0,1 м. В этом случае она составляет единицы сантиметров (2-5 см) или 4-6%, а для координаты  $x$  – 15-20% при отклонении машины на 0,1 м от за-

данной траектории движения. Это может быть связано с погрешностями вычисления скоростей распространения акустического сигнала в породном массиве из-за наличия в нем неучитываемых механических неоднородностей [100, 101].

При отклонении пневмоударной машины от заданной траектории движения на 0,2 м точность измерения координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) уменьшается почти в 2 раза по сравнению с отклонением машины на 0,1 м. Это может быть связано с удалением точки нанесения удара пневмоударной машиной в грунтовый массив от центра между акустоэлектрическими преобразователями.

В работе [104] проведены исследования зависимости отклонения скважины  $\xi$  от первоначального направления и от длины  $L$  скважины (рисунок 4.7).

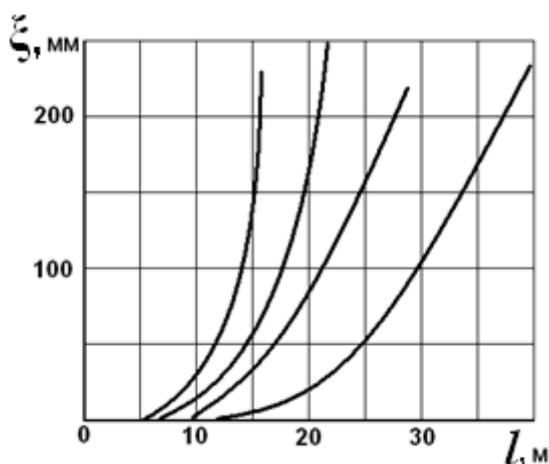


Рисунок 4.7 – Зависимости отклонения  $\xi$  скважины от первоначального направления от длины  $L$  скважины (для пневмопробойника ИП4603); 1 – 1000 мм, 2 – 1250 мм, 3 – 2000 мм, 4 – 2500 мм.

Кривые 1-4 получены при длине направляющей трубы 1000 мм, 1250 мм, 2000 мм и 2500 мм соответственно. Установлено, что после запуска пневмопробойника в грунт он проходит некоторый участок скважины практически прямолинейно. При дальнейшем увеличении длины скважины величина отклонения прогрессивно нарастает [104]. В процессе своего движения буровая машина резко отклониться от своей траектории движения не может. Этот процесс обычно происходит постепенно, поэтому применять разработанный алгоритм определения пространственных координат машины по временам задержки создаваемого ею импульсного акустического

сигнала будет предпочтительней при малых отклонениях машины от заданной траектории движения (от 0 до 0,1 м).

Также точность предлагаемого алгоритма определения пространственных координат машины зависит от ее местоположения относительно центра между акусто-электрическими преобразователями, что требует дополнительного исследования в натуре.

Установлено, что на точность вычисления координат машины влияет метод обработки экспериментальных данных. Так, при обработке экспериментальных данных по уровню  $0,7 \cdot U_{max}$  расчетные значения координат наиболее близки к реальным, а при обработке данных по уровню  $0,1 \cdot U_{max}$  расчетные координаты машины существенно отличаются от реальных значений, что обусловлено высоким уровнем шума в полосе полезного сигнала [101].

Для оценки влияния местоположения источника ударного воздействия на точность измерения пространственных координат пневмоударной машины были выполнены экспериментальные исследования работоспособности предложенного алгоритма при таком расположении приемников акустических сигналов многоканального комплекса PULSE на поверхности земли, что координата  $y = 250$  мм, а пневмопробойник помещался в грунт на глубине 650 мм, т.е. координата  $z = 650$  мм.

Особенность данного эксперимента, выполненного на полигоне «Зеленая горка» ИГД СО РАН, заключается в том, что вблизи места его проведения, слева на расстоянии около 2 м, располагается фундамент здания и бетонная отмостка.

Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 4.8.

В приложении В в таблице В.3 представлены результаты измеренных времен задержки для четырех приемных каналов относительно пятого (с машины). Обработка информации выполнялась по уровню  $0,7 \cdot U_{max}$ , так как в предыдущем эксперименте было установлено, что расчетные значения координат в этом случае наиболее близки к реальным; в таблице В.4 представлены результаты рассчитанных по алгоритму, представленному в п. 4.2 (выражение (4.1)), скоростей распространения упругих волн в грунтовом массиве.

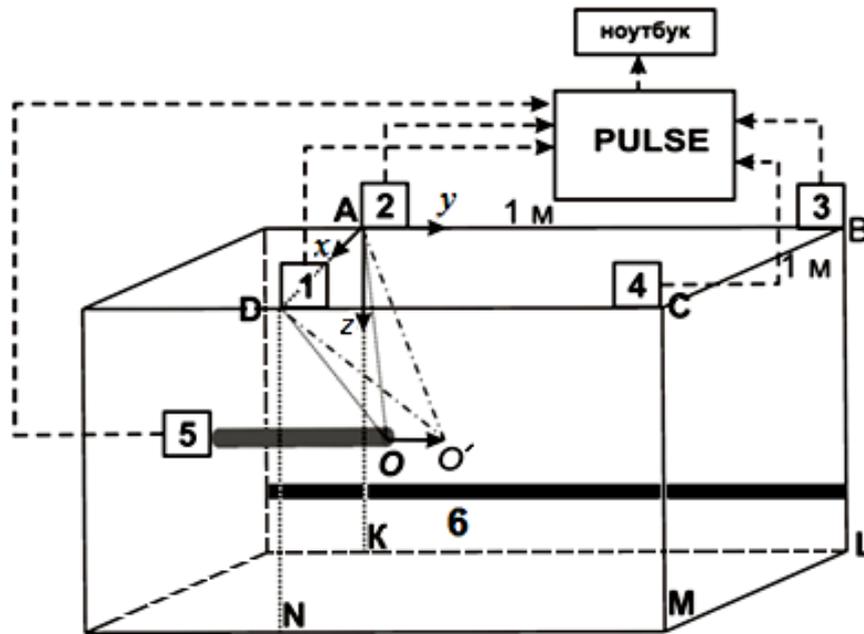


Рисунок 4.8 – Схема проведения эксперимента по измерению времен задержки акустического сигнала, создаваемого движением буровой машины в породном массиве (при  $y = 250$  мм); 1-5 – акселерометры KD29; 6 – фундамент здания

В таблице 4.2 представлены пространственные координаты пневмоударной машины, вычисленные на основе времен задержки распространения акустического сигнала в грунтовом массиве (выражение (4.7)), указанных в таблице В.3.

Экспериментально установлено, что скорость распространения акустического сигнала, создаваемого ударным действием движущейся в грунте пневмоударной машины, зависит от расстояния между акустоэлектрическим преобразователем и местом приложения ударной нагрузки. Так, при измерениях в точках  $B$  и  $C$  (более удалены от источника акустического сигнала, чем точки  $C$  и  $D$ ) скорость распространения акустического сигнала, создаваемого машиной ниже, чем при ее измерении в точках  $A$  и  $D$  (находятся рядом с источником акустического сигнала). В таблице 4.2 представлены результаты расчетов пространственных координат пневмоударной машины в грунте по алгоритму, представленному в п. 4.2.

Определение координат пневмоударной машины в грунтовом массиве при  $y = 250$  мм, то есть когда разница между расстояниями от приемных акселерометров 1, 2, 3, 4 (см. рисунок 4.8) до места приложения ударной нагрузки незначительна, показало, что точность определения координат  $z$  и  $x$  увеличилась в 2 раза по сравне-

нию с результатами, полученными при  $y = 0$ . Данное утверждение справедливо при отклонении пневмоударной машины влево от оси ее движения.

ТАБЛИЦА 4.2 – Расчетные значения пространственных координат пневмоударной машины (координата  $y = 250$  мм) и погрешности их определения

Величина и направление отклонения машины, м	Реальные значения координат, м			Расчетные значения координат машины при обработке сигнала, м		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
0,05 влево	0,45	0,25	0,65	0,487	0,214	0,593
0,1 влево	0,4	0,25	0,65	0,368	0,229	0,627
0,15 влево	0,35	0,25	0,65	0,314	0,199	0,625
0,05 вправо	0,55	0,25	0,65	0,536	0,069	0,46
0,1 вправо	0,6	0,25	0,65	0,609	0,17	0,525
0,15 вправо	0,65	0,25	0,65	0,653	0,234	0,528
Абсолютная погрешность, м (относительная погрешность, %)						
Величина и направление отклонения машины, м	$x$		$y$		$z$	
0,05 влево	0,037 (8,2)		0,036 (14,4)		0,057 (8,8)	
0,1 влево	0,032 (8,0)		0,021 (8,4)		0,023 (3,5)	
0,15 влево	0,036 (10,3)		0,051 (20,4)		0,025 (3,8)	
0,05 вправо	0,014 (2,5)		0,181 (72,4)		0,190 (29,2)	
0,1 вправо	0,009 (1,5)		0,080 (32,0)		0,125 (19,2)	
0,15 вправо	0,003 (0,5)		0,016 (6,4)		0,122 (18,8)	

При отклонении пневмоударной машины вправо от оси ее движения точность определения пространственных координат машины резко снижается, что можно объяснить наличием слева от места проходки скважины фундамента и бетонной от-мостки здания, которые привели к возникновению явления отражения акустической волны на границе раздела сред: «грунт – бетон».

На основе разработанного диссертантом алгоритма вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия и положительных результатов натуральных экспериментов, представленных в настоящем параграфе, совместно с Е.В. Денисовой и А.И. Конуриным разработана многоканальная акустическая измерительная система [105], которая будет рассмотрена ниже.

### **4.3. Результаты испытаний многоканальной акустической измерительной системы в натуральных условиях**

Для оценки работоспособности и точности разработанного алгоритма и созданной на его основе многоканальной акустической измерительной системы для определения пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия целесообразно сравнить данные, зарегистрированные с помощью разработанной системы с данными, зарегистрированными с помощью многоканального измерительного комплекса PULSE (представленных в п. 4.2) при одинаковых условиях эксперимента и алгоритме обработки экспериментальных данных согласно п. 4.2.

Схема испытаний многоканальной акустической измерительной системы (МАИС) представлена на рисунке 4.9 [106]. Фотография места выполнения экспериментальных исследований и экспериментального образца МАИС представлены на рисунке 4.10; условия проведения экспериментальных исследований соответствуют условиям в п. 4.2.

С выходов блоков обработки импульсного акустического сигнала последний поступает на блок вычисления пространственных координат машины многоканальной акустической измерительной системы. На данном этапе разработки многоканальной акустической измерительной системы для вычисления координат пневмоударной машины использовался персональный компьютер с программным обеспечением Microsoft Office, пакет Excel, в котором происходило восстановление формы принятых импульсных акустических сигналов с выхода каждого канала системы одновременно. Далее в этой же программе вычислялись времена задержки поступления акустических сигналов в приемники на поверхности земли, относительно опорного акустического сигнала непосредственно с самой пневмоударной машины.

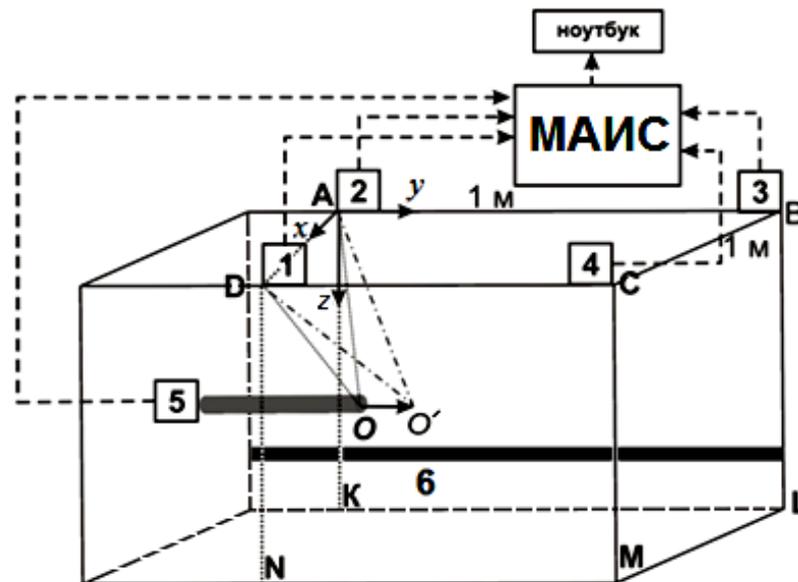


Рисунок 4.9 – Схема проведения натурального эксперимента в грунтовом массиве: 1...5 – измерительные акселерометры KD29, 6 – фундамент здания

*а*



*б*



Рисунок 4.10 – Фотографии экспериментального образца многоканальной акустической измерительной системы (а) и места проведения экспериментальных исследований (б)

Результаты вычислений представлены в таблицу В.5, приложение В.

Определение времен задержки поступления акустического сигнала в расположенные на поверхности земли приемники многоканального комплекса PULSE, относительно опорного акустического сигнала с самой породоразрушающей машины показали, что при отклонении машины от заданной траектории движения более, чем

100 мм, точность предложенного алгоритма определения пространственных координат снижается. Поэтому испытания МАИС выполнялись при отклонении машины от заданной траектории движения на 0,1 м влево и вправо.

Результаты рассчитанных скоростей распространения упругих волн в грунтовом массиве по (4.1) представлены в приложении В (таблица В.6), а в таблице 4.3 – пространственных координат машины по (4.7), на основе рассчитанных времен задержки поступления акустического сигнала, создаваемого движущейся в грунте пневмоударной машиной, в приемники многоканальной акустической измерительной системы относительно опорного сигнала непосредственно с самой машины (таблица В.5).

ТАБЛИЦА 4.3 – Расчетные значения пространственных координат пневмоударной машины (координата  $y = 250$  мм) и погрешности их определения

Величина и направление отклонения машины, м	Реальные значения координат			Расчетные значения координат машины при обработке сигнала по уровню $0,7 \cdot U_{max}$		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
0,05 влево	0,45	0,25	0,65	0,504	0,231	0,61
0,1 влево	0,40	0,25	0,65	0,443	0,248	0,66
0,15 влево	0,35	0,25	0,65	0,364	0,267	0,67
0,05 вправо	0,55	0,25	0,65	0,479	0,183	0,475
0,1 вправо	0,60	0,25	0,65	0,734	0,165	0,602
0,15 вправо	0,65	0,25	0,65	0,782	0,262	0,569
Погрешности						
0,1 влево	0,40	0,25	0,65	0,043 (10,75)	0,002 (0,8)	0,01 (1,54)
0,15 влево	0,35	0,25	0,65	0,014 (4)	0,017 (6,8)	0,02 (3,08)
0,05 вправо	0,55	0,25	0,65	0,071 (12,91)	0,067 (26,8)	0,175 (26,92)
0,1 вправо	0,60	0,25	0,65	0,134 (22,33)	0,085 (34)	0,048 (7,39)
0,15 вправо	0,65	0,25	0,65	0,132 (20,31)	0,012 (4,8)	0,081 (12,46)

Анализ рассчитанных координат пневмоударной машины по измеренным временам задержки акустического сигнала в грунтовом массиве (см. таблицу 4.3) показал, что разработанная многоканальная акустическая измерительная система работоспособна и подходит для решения задачи определения пространственных координат

нат пневмоударной машины, движущейся в грунтовом массиве. Погрешность определения координаты  $x$  составляет от 4 до 22,33%, координаты  $y$  – от 0,8 до 34%, а координаты  $z$  – от 1,54 до 26,92%.

#### 4.4. Разработка технического средства для определения направления поворота рабочего органа относительно оси его движения

Распространенным способом управления траекторией движения скважинообразующего рабочего органа установок для горизонтального направленного бурения является изменение его формы таким образом, чтобы в процессе работы можно было влиять на плотность грунта в направлении, определяемом асимметрией инструмента и вектора равнодействующей статического и ударного усилия [74]. Известен способ управления траекторией движения пневмоударной машины с помощью асимметричной насадки в виде скошенного цилиндра (рисунок 4.11).

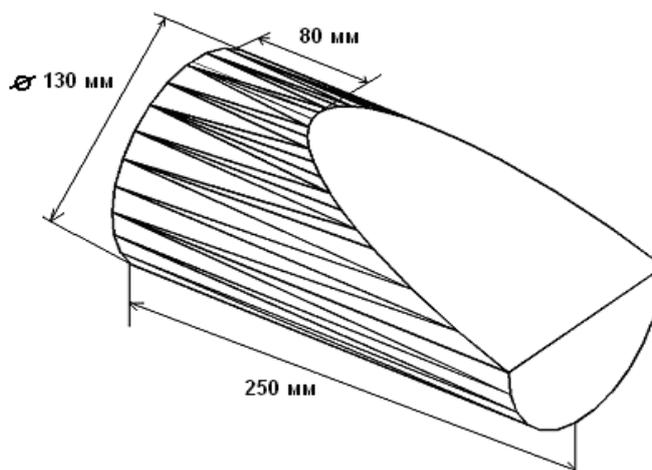


Рисунок 4.11 – Общий вид асимметричной насадки пневмопробойника

Определить положение пневмопробойника, движущегося в грунте, для принятия решения по управлению траекторией его движения невозможно без датчиков угла поворота и положения. В настоящее время в качестве датчиков угла поворота и положения используют различного рода гироскопы или инклинометры, которые ус-

танавливают на скважинообразующий рабочий орган, используемый в основном для формирования вертикальных скважин. К таким устройствам предъявляются достаточно жесткие требования:

- минимальные габариты;
- минимальное время непрерывной работы – 2 часа;
- высокая надежность при воздействии ударных нагрузок.

Их размещение на установках для горизонтального бурения весьма проблематично, так как нагрузки, возникающие при работе пневмоударной машины, в несколько десятков-сотен раз превышают нагрузки на машинах, предназначенных для вертикального бурения.

В связи с этим диссертантом дополнена разработанная многоканальная акустическая измерительная система, представленную в п. 4.4, шестым каналом, который будет принимать информацию от устройства, определяющего угол поворота асимметричной насадки, закрепленного непосредственно на рабочем органе породоразрушающей машины.

Работа этого устройства [107] основана на использовании ртутных датчиков, которые позволяют отслеживать горизонтальное положение машины (одновременно с асимметричной насадкой, рисунок 4.12) и ее поворот вокруг своей оси «по и против часовой стрелки». Оператор на поверхности земли по срабатыванию световых индикаторов на устройстве обработки информации (приемнике) принимает решение о корректировании траектории движения машины. Передача информации на поверхность земли осуществляется с помощью акустических колебаний, а само устройство располагается внутри асимметричной насадки.

Для повышения точности работы устройства предлагается использовать, например, ртутный датчик фирмы *Assemtch*, марки *CW-1300-1* (Англия) (рисунок 4.13) с минимальным дифференциальным углом (при котором происходит гарантированное срабатывание датчика). Параметры датчика [65] представлены в таблице 4.4.

Малые габариты датчика позволяют поместить всю конструкцию акустического устройства вместе с аккумуляторами в полость, расположенную внутри асимметричной насадки. Корпус датчиков изготовлен из стали и может выдерживать нагрузки, которые будут воздействовать на насадку. Блок-схема разработанного устройства показана на рисунке 4.14.

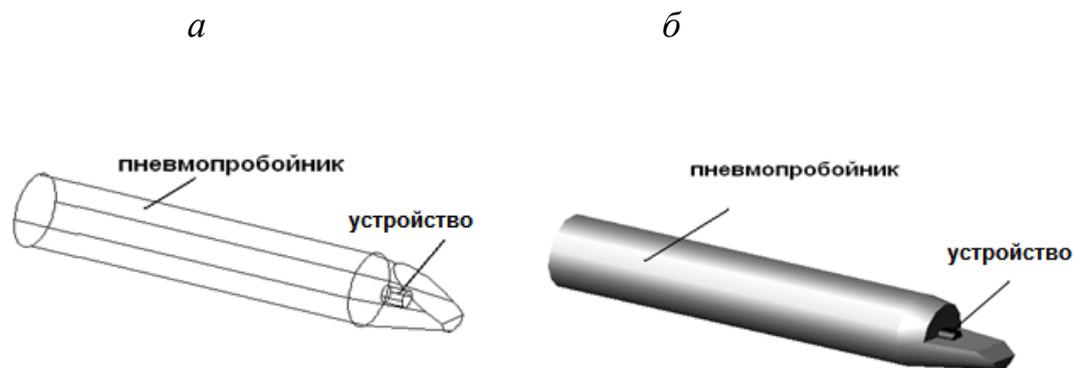


Рисунок 4.12 – Размещение технических устройств на рабочем органе пневмоударной машины: а – общий вид; б – вид с поперечным разрезом конусной насадки пневмопробойника

ТАБЛИЦА 4.4 – Параметры ртутного датчика CW-1300-1

Дифференциальный угол $\alpha''$ , град	10
Напряжение переключения, В	240
Ток переключения, А	0.2
Сопротивление контактов, Ом	1
Рабочая температура, °С	от -37 до +100
Диаметр корпуса, мм	4.7
Материал корпуса	сталь
Длина датчика с выводами, мм	27



Рисунок 4.13 – Внешний вид ртутного датчика фирмы *Assemtech*

Ртутные датчики 1, 2, 3 вместе с мультивибраторами 4, 5, 6 и акустическим излучателем расположены на плате, например, в виде круга из стеклотекстолита (рисунок 4.15 а). Диаметр круга определяется внутренним диаметром насадки. Вся конструкция помещена в полость насадки так, чтобы его плоскость, относительно которой ориентируют устройство, располагалась перпендикулярно оси второго, среднего, ртутного датчика 2, когда его контакты замкнуты. Для правильной работы устройство должно оставаться неподвижным относительно корпуса машины.

Устройство с передачей информации по акустическому каналу с помощью электроакустического преобразователя излучает информативный сигнал, который на поверхности земли принимается любым акустическим приемником.

В качестве приемника может быть использован шестой приемный канал предложенной в п. 4.2 многоканальной акустической измерительной системы с акусто-электрическим преобразователем – акселерометром KD29.

О положении насадки судят по срабатыванию соответствующего светового индикатора, однозначно связанного с частотой соответствующего мультивибратора.

Изготовлен экспериментальный образец такого устройства (рисунок 4.15 б), работоспособность которого была проверена в лабораторных условиях. Для герметизации устройство вместе с аккумуляторами помещено во влагонепроницаемый и ударостойкий контейнер.



Рисунок 4.14 – Блок-схема устройства для определения направления поворота насадки пневмопробойника с передачей информации на поверхность земли по акустическому каналу связи

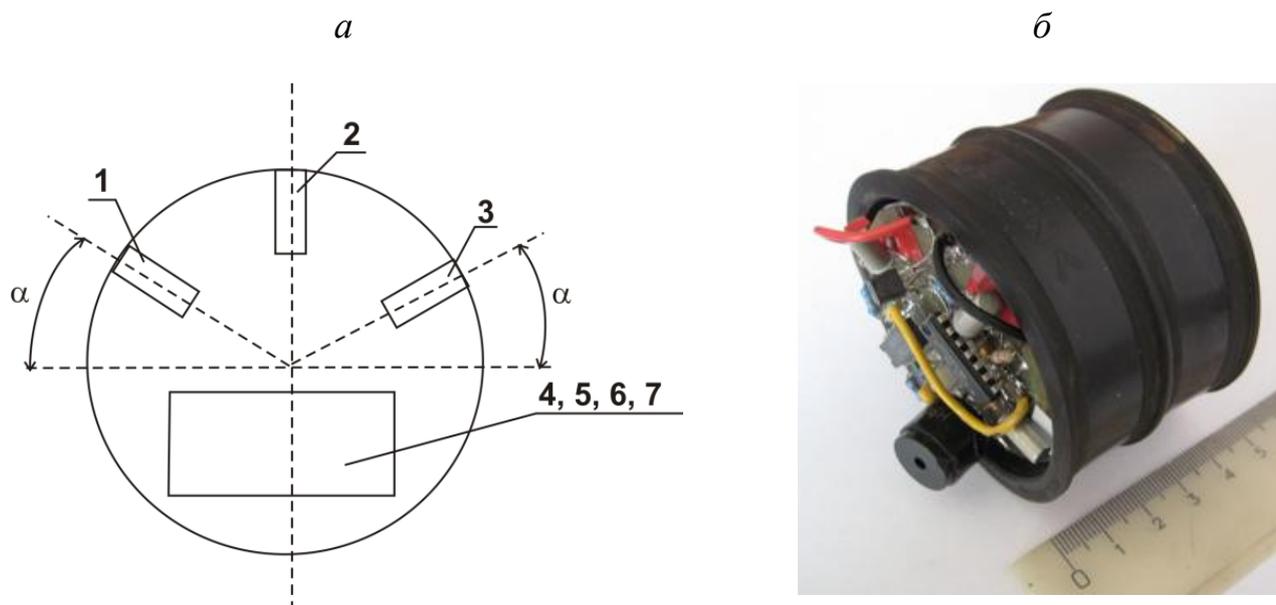


Рисунок 4.15 – Размещение компонентов устройства на плате (а) и фотография экспериментального образца устройства для определения направления поворота насадки пневмопробойника относительно оси его движения с передачей информации на поверхность земли по акустическому каналу связи (б): 1-3 – ртутные датчики; 4-6 – мультивибраторов 4-6; 7 – акустический излучатель;  $\alpha$  – дифференциальный угол, определяется типом датчика

Достоинствами разработанного устройства являются:

- использование акустического сигнала для беспроводной передачи информации на поверхность земли;
- простота практического изготовления устройства;
- надежность;
- невысокая стоимость.

Для дальнейших исследований интерес представляет взаимосвязь направления поворота рабочего органа буровой машины относительно оси движения и физико-механических свойств грунта, в котором бурится скважина.

На основании представленных в настоящей главе исследований сформулировано третье научное положение: *разработанная многоканальная акустическая измерительная система позволяет определять пространственные координаты рабочего органа пневмоударной машины, движущейся в грунте, и контролировать процесс проходки скважины с погрешностью не более 12%, основываясь на вычислении времен задержки поступления акустического импульсного сигнала, индуцируемого*

*пневмоударной машиной и регистрируемого на поверхности земли, относительно сигнала непосредственно с машины.*

## **Выводы**

По проведенным теоретическим и натурным исследованиям можно заключить следующее:

1. Разработан алгоритм определения пространственных координат источника динамического воздействия на породный массив применительно к решению задачи контроля процесса проходки скважин буровыми машинами ударного действия для исключения искривления ствола скважины. При этом установлено, что на точность определения пространственных координат источника динамического воздействия на породный массив влияют степень его неоднородности, способ обработки экспериментальных данных, а также расстояние между рабочим органом буровой машины ударного действия и акустоэлектрическими преобразователями;

2. Разработана и испытана в натуральных условиях многоканальная акустическая измерительная система, позволяющая определять пространственные координаты породоразрушающего инструмента буровой машины ударного действия в однородном грунтовом массиве с погрешностью, не превышающей 12%;

3. Разработано техническое средство, предназначенное для определения направления отклонения рабочего органа буровой машины ударного действия относительно оси его движения с использованием ртутных датчиков; изготовлен и испытан в лабораторных условиях экспериментальный образец разработанного технического средства.

Таким образом, контроль процесса проходки измерительных скважин в породных массивах на основе акустического метода и разработанного диссертантом алгоритма определения пространственных координат источника акустического импульсного сигнала представляет собой второй этап Комплексного метода. Реализа-

ция предложенного Алгоритма в многоканальной акустической измерительной системе позволяет определять пространственные координаты рабочих органов буровых машин ударного действия, что, в свою очередь, позволяет регистрировать начало отклонения ствола буримой скважины от заданной траектории движения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся научно-квалификационной работой, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно-обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, обеспечивающие обоснованный выбор места заложения скважин геомеханических измерений и контроль процесса их бурения. Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Исследовано влияние толщины, влажности и размера фракций прослоя на контакте «железобетонная крепь – массив вмещающих пород» на дальность действия георадиолокационного метода; при этом установлено, что:

- при значительном (от 4 и более раз) отличии диэлектрической проницаемости бетона и прослоя дальность действия георадиолокационного метода уменьшается на 30%;
- в случае, когда линейные размеры фракций прослоя эквивалентны длине волны зондирующего сигнала дальность действия метода георадиолокации снижается за счет многочисленных переотражений электромагнитного зондирующего сигнала от граней частиц слоя на 19%.

2. Обосновано использование метода сверхвысокочастотной (до 3 ГГц) георадиолокации для выбора мест заложения скважин геомеханических измерений. При этом:

- разработана методика георадиолокационного обследования участка железобетонной крепи горной выработки для определения местоположения искусственных (стержни металлической арматуры, проложенные коммуникации) и естественных (пустоты, зоны разуплотнения) неоднородностей;
- выполнена апробация разработанного порядка в натуральных условиях на одном из горных предприятий Красноярского края – обследована железобетонная обделка подземных горных выработок, рекомендованы места проходки измерительных скважин геомеханического контроля, а также на полигоне ИГД СО РАН «Зеле-

ная горка» при проходке горизонтальной скважины в грунтовом массиве пневмоударной машиной.

3. Разработан алгоритм определения пространственных координат источника динамического воздействия на породный массив применительно к решению задачи контроля процесса проходки скважин буровыми машинами ударного действия для исключения искривления ствола скважины. При этом установлено, что на точность определения пространственных координат источника динамического воздействия на породный массив влияют степень его неоднородности, способ обработки экспериментальных данных, а также расстояние между рабочим органом и акустоэлектрическими преобразователями;

4. Разработана и испытана в натуральных условиях многоканальная акустическая измерительная система, позволяющая определять пространственные координаты породоразрушающего инструмента буровой машины ударного действия в однородном грунтовом массиве с погрешностью, не превышающей 12%;

5. Разработано и испытано в лабораторных условиях техническое средство, предназначенное для определения направления отклонения рабочего органа буровой машины ударного действия относительно оси его движения с использованием ртутных датчиков.

Таким образом, совместное применение сверхвысокочастотного георадиолокационного и акустического методов, а также разработанных методики обследования участка железобетонной крепи горной выработки георадиолокационным методом и алгоритма вычисления пространственных координат рабочего органа буровой машины ударного действия образуют комплексный геофизический метод для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Фрейдин, А.А. Подземная разработка рудных месторождений: учебное пособие / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов; под ред. чл.-корр. РАН В.Н. Опарина. – Часть 1. – Новосибирск: ИГД СО РАН – НГУ, 2012. – 208 с.
2. Мельников, Н.Н. О фундаментальных проблемах освоения месторождений полезных ископаемых России и основных направлениях развития горных наук / Н.Н. Мельников, В.Н. Опарин, М.Д. Новопашин, В.Л. Яковлев, Ю.А. Мамаев, В.П. Потапов // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: Труды конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2007. – Т. I. – С. 5 – 23.
3. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль на рудниках / С.М. Простов, Б. Г. Тарасов, В. В. Дырдин, В. А. Хямяляйнен – ГУ КузГТУ, 2003. – 166 с.
4. Шкуратник, В.Л. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко. – М.: МГГУ, 2012. – 112 с.
5. Гребенкин, С.С. Управление состоянием массива горных пород: учебное пособие / С.С. Гребенкин, В.Н. Павлыш, В.Л. Самойлов, Ю.А. Петренко. – Донецк: "ВИК", 2010. – 193 с.
6. Заславский, Ю.З. Крепление подземных сооружений: / Ю.З. Заславский, В.М. Мостков. – М.: Недра, 1979. – 325 с.
7. Брызгалов, В.И. Контроль напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС / В.И. Брызгалов, В.Д. Барышников, В.А. Булатов, Л.Н. Гахова // Гидротехническое строительство. – 2000. – № 10. – С. 51.
8. Зотеев, О.В. Геомеханика: учебное пособие для студентов ВУЗов / О.В. Зотеев. – Екатеринбург: УГГУ, ИГД УРО РАН, 2003. – 252 с.

9. Лавров, А.В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) / А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – С. 6 – 18
10. Алексеев, Д. В. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород / Алексеев Д. В. и др. // ФТПРПИ. – 1993. – № 5. – С. 27 – 30
11. Рубан, А.Д. Горная геофизика. Электрометрические методы геоконтроля. Часть III: учебное пособие / А.Д. Рубан, Ю.Н. Бауков, В.Л. Шкуратник. – М.: МГГУ, 2002. – 148 с.
12. Барковский, В.М. Состояние и перспективы развития метода полной разгрузки / В.М. Барковский // В сб.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Ч.1. – 1976. – С. 27 – 32.
13. Ямщиков, В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов: учебник для ВУЗов / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
14. Курленя, М.В. Предельные размеры породного керна с центральной скважиной: монография / М.В. Курленя, А.В. Леонтьев // В сб.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск. – 1970. – С. 42 – 46.
15. Руководство по применению метода разгрузки для определения напряженного состояния в глубине горных массивов. – Л.: изд. ВНИМИ, 1960. – 15 с.
16. Руководство по применению метода разгрузки керна с центральной скважиной для определения напряжений в массиве осадочных горных пород. – Новосибирск: изд. ИГД СО АН СССР, 1969. – 62 с.
17. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах. / Отв. ред. Е.И. Шемякин. – Новосибирск: изд. «Наука», 1975. – 150 с.
18. Зубков, А.В. Геомеханика и геотехнология: монография / А.В. Зубков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335с.
19. Влох, Н.П. Совершенствование метода щелевой разгрузки / Н.П. Влох, А.В. Зубков, Ю.Г. Феклистов // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сборник научных трудов. – 1980. – С. 30 – 35.

20. Аксенов, В.К. Разгрузка массива щелью как средство для определения абсолютных напряжений в горных породах / В.К. Аксенов, М.В. Курленя, А.И. Петров // ФТПРПИ. – 1972. – №2. – С. 122 – 124.
21. Барях, А. А. Интерпретация результатов щелевой разгрузки / А.А. Барях, Н.А. Еремина, В.А. Асанов // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций. – Екатеринбург. – 1997. – С. 17 – 22.
22. Влох, Н.П. Прогноз удароопасности выработок на стадии проектирования горных работ / Н.П. Влох, А.В. Зубков, Я.И. Липин // В сб.: Прогноз и предотвращение горных ударов на рудных месторождениях. – 1987. – С. 50 – 54.
23. А. с. № 877005 СССР, Способ определения НДС в массиве горных пород / М.В. Курленя, В.Д. Барышников, Г.Ф. Бобров, С.Н. Попов, В.К. Федоренко. – Оpubл. в 1981, бюл. № 40.
24. Барышников, В. Д. Способ натурального определения упругих свойств горных пород в методе параллельных скважин / В. Д. Барышников, М.В. Курленя, С.Н. Попов и др. // ФТПРПИ. — 1982. – №1. – С. 18 – 23.
25. Барышников, В.Д. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве / В.Д. Барышников, М.В. Курленя, Гахова // Гидротехническое строительство. – 1998. – №9. – С. 59.
26. Катков, Т. А. Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов: монография / Т.А. Катков. – М: Наука, 1978. – 130 с.
27. Грицко, Г.И. Измерение напряжений в горных породах фотоупругими датчиками: монография / Г.И. Грицко, Г.И. Кулаков. – Новосибирск: Наука, 1976. – 142 с.
28. Влох, Н.П. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород: монография / Н.П. Влох, А.Д. Сашурин. – М.: Недра, 1970. – 120 с.
29. Кулаков, Г.И. Методы определения упругих постоянных горных пород с использованием фотоупругих датчиков / Г.И. Кулаков // Измерение напряжений в массиве горных пород. – 1974. – Ч.1. – С. 107 – 114.

30. Трумбачев, В.Ф. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий: монография / В.Ф. Трумбачев, Г.А. Катков. – М.: Наука, 1966. – 115 с.
31. Опарин, В.Н. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки параметры, воздействие на объекты недропользования: монография / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин, Г.И. Кулаков, А.В. Леонтьев, Л.А. Назаров и др.; отв. ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.
32. Курленя, М.В. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород / М.В. Курленя, А.В. Леонтьев, С.Н. Попов // ФТПРПИ. – 1994. – № 1. – С. 3 – 20.
33. Шкуратник, В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы: учебное пособие / В.Л. Шкуратник. – М.:МГИ, 1990. – 104 с.
34. Каспарьян, Э.В. Устойчивость горных выработок в скальных породах: монография / Э.В. Каспарьян. – Л.: Наука, 1985. – 183 с.
35. Шкуратник, В.Л. Исследование влияния напряжений на скорость распространения упругих волн в окрестности эллиптической горной выработки / В.Л. Шкуратник, Г.В. Данилов // ФТПРПИ. – 2005. – №3. – С. 3 – 10.
36. Ямщиков, В.С. К созданию методологических основ измерений в массиве / В.С. Ямщиков, А.В. Блок // ФТПРПИ. – 1974. – С. 18 – 23.
37. Анцыферов, М.С. Сейсмоакустические исследования в угольных шахтах: монография / М.С. Анцыферов, Л.Г. Константинова, Л.Б. Переверзев. – М.: Изд-во АН СССР, 1980. – 132 с.
38. Болотин, Ю.И. Об измерениях координат и энергии акустической эмиссии в массивах горных пород / Ю.И. Болотин // Дефектоскопия. – 1993. – №3. – С. 26 – 29.
39. Курленя, М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород // монография. – Новосибирск: Наука, 1999. – 219 с.

40. Борис, И.Н. Ядерно-геофизические методы апробирования при добыче и переработки минерального сырья: монография / И.Н. Борис, Х.Б. Авсарагов. – Л.: Наука, 1972. – 149 с.
41. Гулин, А.Ю. О характере зависимости показаний нейтронного каротажа от пористости пород / А.Ю. Гулин // «Прикладная геофизика». – 1973. – вып.72. – С. 204 – 214.
42. Kaiser, J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen / J. Kaiser // Archiv fur das Eisenhüttenwesen. – 1953. – Vol. 24. – No. 1/2. – P. 43 – 45.
43. Ржевский, В.В. Эмиссионные эффекты "памяти" в горных породах / В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 273. – № 5. – С. 1094 – 1097.
44. Kanagawa, T. Estimation of spatial geo-stress components in rock samples using the Kaiser effect / T. Kanagawa, M. Hayashi, H. Nakasa // Centr. Res. Inst. of Electric Power Ind. (CRIEPI). – 1976. – Report № 375017.
45. Yoshikawa, S. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression / S. Yoshikawa, K. Mogi // Tectonophysics. – 1981. – Vol. 74. – №. 3/4. – P. 323 – 339.
46. Бауков, Ю.Н. Горная геофизика. Геоконтроль неидеальных и неоднородных сред акустическими методами: учебное пособие / Ю.Н. Бауков – М.: Издательство МГГУ, 1999. – Ч.2. – 166 с.
47. Петровский, М.А. Экспериментальное исследование эффекта Кайзера в горных породах / М.А. Петровский, Л.Л. Панасьян // Вестник МГУ. –1983. – № 3. – Сер. 4. – Геология. – С. 98 - 101
48. Ямщиков, В.С. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, К.Г. Лыков // ФТПРПИ. – 1990. – № 2. – С. 23 – 28.
49. Простов, С.М. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль / С.М. Простов, В.В. Дырдин, В.А. Хямяляйнен. – Кемерово: ГУ Кузбасский государственный технический университет, 2002. – 132 с.

50. Финкельштейн, М.И. Радиолокация слоистых земных покровов: учебное пособие / М.И. Финкельштейн, В.А. Мендельсон, В.А. Кутев. – М.: Советское радио, 1977. – 151 с.
51. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию: Учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
52. Барышников, В.Д. К вопросу инструментальной оценки напряжений в бетонном массиве / В.Д. Барышников, Д.В. Барышников // Труды XX Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. – С. 100 – 106.
53. Репин, А.А. Направления развития погружных пневмоударников / А.А. Репин, С.Е. Алексеев // Сборник трудов Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – Т. II. – С. 30 – 39.
54. Репин, А.А. Создание пневмоударников для работы на повышенном давлении энергоносителя / А.А. Репин, С.Е. Алексеев // Сборник трудов Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – Т. II. – С. 30 – 40.
55. Липин А.А. Перспективные пневмоударники для бурения скважин // ФТПРПИ – Новосибирск: изд. СО РАН, 2005. – №2 – с. 74-79.
56. Трубецкой, К.Н. Горные науки, освоение и сохранение недр земли: учебное пособие / Под ред. К.Н. Трубецкого. – М: Изд. Академии горных наук, 1997. – 247 с.
57. Алексеев, С.Е. Создание и внедрение в производство мощных погружных пневмоударников / С.Е. Алексеев, А.А. Репин, Г.А. Пятнин // Труды конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2007. – Т. II. – С. 9 – 13.
58. Система управления буровой головкой под землей DigiTrack SE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russian.digital-control.com/ru/products/se>

59. Комплекс Eclipse [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russian.digital-control.com/products/discontinued/eclipse.html>
60. Комплекс Mark V [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russian.digital-control.com/products/discontinued/markv.html>
61. Система навигационная сенсорная SNS-100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sense-inc.ru/assets/templates/sense/doc/SNS100.pdf>
62. Локационная система горизонтально направленного бурения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sense-inc.ru/assets/templates/sense/doc/SNS200-PRO.pdf>
63. Опарин, В.Н. Принципы построения радиочастотных систем навигации для бестраншейных технологий прокладки подземных коммуникаций: монография / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова. – Новосибирск: изд. СО РАН, 2011. – 137 с.
64. Рыбаков, А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика): технический учебник – справочник / А.П. Рыбаков. – М: Пресс Бюро № 1, 2005. – 304 с.
65. Трубицын, В.В. Контроль движения пневмопробойника по колебаниям грунта / В.В. Трубицын, В.В. Червов // ФТПРПИ – 1998. – №4. – С. 117 – 121.
66. Пат. 116573 Российская Федерация, МПК Е 21 В47 0224, Акустический обнаружитель горизонтального местоположения источника звука в грунте / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, А.И. Конурин; заявитель и патентообладатель Учреждение РАН ИГД СО РАН. – № 2011152696/03; заявл. 22.12.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.
67. Денисова, Е.В. О результатах испытаний многоканального комплекса для контроля геомеханических процессов / Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, А.И. Конурин // Вестник КузГТУ. – 2012.
68. Денисова, Е.В. О возможности контроля процесса разрушения породного массива буровой машиной по временам задержки создаваемого ею акустического сигнала / Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, А.П. Хмелинин, Я.З. Бадмаева // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 5. – С. 109 – 113.

69. USA, United States Patent № 6,886,644. Apparatus and method for horizontal drilling / Vermeer Manufacturing Company. USA. Appl. No.: 10/224,205., Publ. May 3, 2005.

70. USA, United States Patent №8,213,264. Method and device of measuring location, and moving object / Samsung Electronics Co., Ltd., USA. Appl. No.: 12/656,024. Publ. July 3, 2012.

71. USA, United States Patent № 8,264,909. System and method for depth determination of an impulse acoustic source by cepstral analysis / The United States of America as represented by the Secretary of the Navy, USA. Appl. No.: 12/698,679. Publ. September 11, 2012.

72. Финкельштейн, М.И. Подповерхностная радиолокация: учебное пособие / М.И. Финкельштейн, В.И. Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин. – М.: Радио и связь, 1994. – 216 с.

73. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии: учебное пособие / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев. – М.: Недра, 1986. – 128 с.

74. Сколник, Н.И. Справочник по радиолокации: Т. 2 / Н.И. Сколник. – М.: Советское радио, 1979. – 408 с.

75. Вопросы перспективной радиолокации: коллективная монография / под ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.: ил.

76. Стеж, П.Е. К теории распространения электромагнитных волн в слоистых земных покровах / П.Е. Стеж // Радиотехника и электроника. – 1974. – №10. – С. 2066 – 2073.

77. Омеляненко, А.В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород: монография / А.В. Омеляненко, Л.Л. Федорова. – Якутск: ЯФ Изд. СО РАН, 2004. – 234 с.

78. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций, введены в действие письмом Росавтодора. – М. – № ОС-28/477 от 28.01.2004, Москва.

79. Положения о порядке производства работ по геофизическому обследованию объектов улично-дорожной сети города Москвы. – М. – принято распоряжением Правительства Москвы от 24 июля 2007 года № 1563-ПП
80. Руководство по эксплуатации георадара SIR-3000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-SIR-3000Brochure.pdf>.
81. Вознесенский, А.С. Системы контроля геомеханических процессов: учебное пособие / А.С. Вознесенский. – М.: Издательство МГГУ, 2002. – 152 с.
82. Рассказов, И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках дальневосточного региона: монография / И.Ю. Рассказов. – М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 329 с.
83. Долуханов, М.П. Распространение радиоволн: монография / М.П. Долуханов – М.: Гос. изд. литературы по вопросам связи и радио, 1960. – 392 с.
84. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах: монография / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
85. Дебай, П. Теория электрических свойств молекул: монография / П. Дебай, Г. Закк, под ред. Л.Э. Гуревича. – М.: Объединенное научно-технич. изд., 1936. – 245 с.
86. Картозия, Б.А. Шахтное и подземное строительство, т. 1: учебник / Б.А. Картозия, Б.И. Федунец. – М.:Изд. Академии горных наук, 2001. – 312 с.
87. Финкельштейн, М.И. Основы радиолокации: учебник для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. / М.И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с, ил.
88. Седлецкий, Р.М. Эффективная площадь рассеивания идеально проводящих тел простейшей формы в средах с комплексной проницаемостью / Р.М. Седлецкий // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – №9. – С. 17 – 25.
89. Денисова, Е.В. Исследование влияния физико-механических свойств геосреды на точность геофизических методов при локации подземных объектов / Е.В. Денисова, А.П. Хмелинин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 10. – С. 107 – 109.

90. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1976. – 295 с.
91. Мочернюк, Д.Ю. Физическое моделирование инженерных процессов: монография / Д.Ю. Мочернюк. – Л.: Высшая школа, 1987. – 160 с.
92. Шкуратник, В.Л. Измерения в физическом эксперименте: монография / В.Л. Шкуратник. – М.: изд. Академии горных наук, 2000. – 256 с.
93. Плешко, М.С. Аналитическое исследование способов повышения несущей способности монолитной бетонной крепи вертикальных стволов / М.С. Плешко // ГИАБ. – 2012. – №8. – С. 263 – 268
94. Пособие по обследованию бетонных конструкций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.geophysical.com/gssiSupport/Manuals/MN72367E1%20Concrete%20Handbook.pdf>.
95. Описание георадара SIR-3000 [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.geophysical.com/sir3000.htm>
96. Денисова, Е.В. Особенности исследования многослойных геосред радиолокационным методом / Е.В. Денисова, А.П. Хмелинин // Науки о Земле. Современное состояние: Материалы II Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции. Новосибирск: РИНЦ НГУ, 2014. – 304 с.
97. Хмелинин, А.П. Методика исследования железобетонных конструкций подземных сооружений на наличие в них неоднородностей различного типа / А.П. Хмелинин // Электронный сборник 10-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – М.: ИПКОН РАН, 2013. – С. 89 – 93.
98. Барышников, В.Д. Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода / В.Д. Барышников, А.П. Хмелинин, Е.В. Денисова // ФТПРПИ. – 2014. – № 1. – С. 30 – 38.
99. Денисова, Е.В. О возможности использования георадара SIR-3000 при бестраншейных технологиях прокладки подземных коммуникаций / Е.В. Денисова, А.П. Хмелинин // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 6. – С. 23 – 26.

100. Денисова, Е.В. О результатах испытаний многоканального комплекса для контроля геомеханических процессов / Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, А.И. Конуриной // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 6. – С. 16 – 19.

101. Денисова, Е.В. О возможности контроля процесса разрушения породного массива буровой машиной по временам задержки создаваемого ею акустического сигнала / Е.В. Денисова, И.В. Тищенко, А.П. Хмелинин, Я.З. Бадмаева // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 5. – С. 109 – 113.

102. Система сбора и обработки информации серии PULSE (руководство пользователя) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://bruel.ru/UserFiles/File/What\\_is\\_PULSE\\_clear\\_vers.pdf](http://bruel.ru/UserFiles/File/What_is_PULSE_clear_vers.pdf).

103. ГОСТ 5348-2002 "Механическое крепление акселерометров". – М.: Стандартиформ, 2002.

104. Гурков, К.С. Пневмопробойники: монография / К.С. Гурков, В.В. Климашко, А.Д. Костылев и др. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 1990. – 213 с.

105. Патент РФ на полезную модель №136589. Измеритель координат работающей пневмоударной машины / Е.В. Денисова, В.Н. Опарин, А.П. Хмелинин, А.И. Конуриной // Заявитель и патентообладатель: ИГД СО РАН – опуб. 2014. – бюл. № 21.

106. Опарин, В.Н. Многоканальная акустическая система контроля процесса движения пневмоударной машины в грунтовом массиве и алгоритм обработки измерительной информации / В.Н. Опарин, Е.В. Денисова, А.П. Хмелинин, Я.З. Бадмаева, Н.С. Полотнянко // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – С. 187 – 197.

107. Патент РФ на изобретение №2410537. Устройство для определения положения инструмента для формирования наклонных и горизонтальных скважин (варианты) / Е.В. Денисова, С.Ю. Гаврилов, И.В. Тищенко, А.П. Хмелинин, С.С. Ершов // Заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН – опуб. 2011. – бюл. № 3.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Георадар SIR-3000: технические параметры, комплектация**

Параметры SIR-3000 приведены в таблице А.1, а на рисунке А.1 представлена фотография георадара с комплектом антенных блоков с разными центральными частотами.

ТАБЛИЦА А.1 – Основные технические характеристики георадара SIR-3000

<b>Система</b>	
Антенны	Совместим со всеми антеннами GSSI: 16-80 МГц, 100 МГц, 200 МГц, 270 МГц, 400 МГц, 900 МГц, 1600 МГц, 2000 МГц, 2600 МГц
Число каналов	1 (один)
Хранение данных	Встроенная память: флеш-карта 2 Гб, Порт CompactFlash: соответствует промышленному стандарту CompactFlash 2 Гб (файловая система FAT 16)
Дисплей	Улучшенный TFT дисплей с диагональю 8,4 дюйма, разрешение 800x600, 64 000 цветов
Режимы дисплея	Строчная развертка, осциллографический, трехмерный
<b>Сбор данных</b>	
Формат данных	RADAN (.dzt)
Скорость записи	220 сканирований/с при разрешении 256 точек (разрядность 16 бит); 120 сканирований/сек при разрешении 512 точек
Интервал записи	По выбору пользователя
Разрешение по вертикали	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192
Режимы съемки	Свободный прогон, одометр, точечный
Диапазон длительности приема отраженного сигнала	0-8000 нс, по выбору пользователя Усиление: ручное или автоматическое, от 1-5 точек усиления (от -20 до +80 дБ)
Фильтры	Вертикальные: низко- и высокочастотные, IIR (асимптотические) или FIR (конечные) Горизонтальные: усреднение, удаление фона
Диапазон передачи	До 100 кГц
<b>Языки интерфейса</b>	
Английский, французский, итальянский, немецкий, испанский, японский, китайский	
<b>Эксплуатационные характеристики</b>	
Рабочая температура	от -10°C до 40°C
<b>Габаритно-массовые характеристики</b>	
Габариты	31,5 (Д) x 22 (Ш) x 10,5 (В) см (12,4 x 8,7 x 4,1 дюйма)
Вес	4,1 кг (9 фунтов) с аккумулятором
Защита от условий окружающей среды	Влагозащита
Производитель	Geophysical Survey Systems, Inc., США

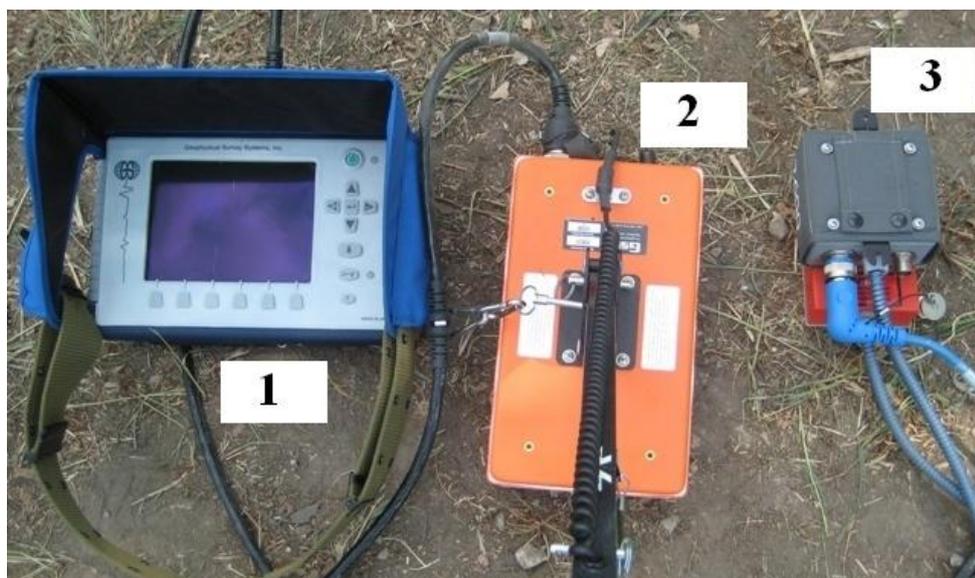


Рисунок А.1 – Георадар SIR-3000 с комплектом антенных блоков: 1 – георадар; 2 – антенный блок с центральной частотой 900 МГц; 3 – антенный блок с центральной частотой 2600 МГц

В большинстве георадаров применяются дипольные или щелевые антенны, излучатель и приемник которых объединены в один приемо-передающий блок и размещены на фиксированное расстояние (на постоянной базе). Применение антенных блоков с разными центральными частотами позволяет получать георадиолокационные разрезы с разной глубиной зондирования и разрешающей способностью по дальности.

Для получения достоверных результатов измерений и корректной эксплуатации георадара перед проведением исследований необходимо выполнять предварительную настройку прибора. Для этого рассмотрим интерфейс георадара SIR-3000.

Меню прибора состоит из следующих разделов:

- Сбор данных (Collect).
- Воспроизведение (Playback).
- Вывод информации (Output).
- Настройки системы (System).

Раздел "Сбор данных" определяет режим работы прибора, а также качество и достоверность результатов георадиолокационного обследования; его подменю доступны оператору для редактирования. Настройки данного раздела определяют дос-

товерность получаемых данных, поэтому ниже рассматривается каждое подменю отдельно (таблица А.2).

ТАБЛИЦА А.2 – Параметры раздела «Сбор данных»

Наименование параметра	Значение
<b>Подменю «Радар» (RADAR)</b>	
Центральная частота антенны	Соответствует центральной частоте используемого антенного блока; устанавливается оператором вручную
Скорость передачи антенны	Скорость обмена данными между антенным блоком и георадаром. Рекомендуемое значение 100 кГц
Режим сканирования	<p>Определяет режим сбора данных и зависит от целей сканирования. Доступны следующие значения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– на базе расстояния («Расстояние») – доступен при подключенном измерительном колесе/тележке; необходим для построения 3D-снимков исследуемой среды;</li> <li>– на базе времени («Время») – если отсутствует измерительное колесо/тележка; прибор не отслеживает расстояние, пройденное антенным блоком при сканировании;</li> <li>– точечное сканирование; применяется при исследованиях больших глубин, а также в сложных условиях съемки</li> </ul>
Использование GPS	Позволяет осуществить привязку радарограмм к координатам глобальным GPS
<b>Подменю "Сканирование" (SCAN)</b>	
Выборки	Определяет количество записываемых точек в каждой трассе. Доступны следующие значения параметра: 512, 1024, 2048, 4096, 8192 точки. Рекомендуемым параметром является значение 1024 точки
Формат	Определяет формат файла данных, сохраняемых георадаром. Доступные значения 8 bit и 16 bit
Диапазон	Определяет промежуток время, в течение которого георадар принимает отраженные сигналы. Доступны значения от 5 нс до 8000 нс
Диэлектрическая проницаемость среды	Задаёт диэлектрическую проницаемость сканируемой среды. Необходимо для вычисления глубины нахождения неоднородностей
Скорость сканирования	Определяет количество сканирований, которые производит прибор за 1 секунду. Важен при работе в режиме «Время»
Сканирование/Длина	Определяет количество сканирований на единицу длины. Важно при работе в режиме «Расстояние» (при использовании измерительного колеса)
<b>Подменю «Усиление» (GAIN)</b>	
	Позволяет искусственно усилить принятый сигнал для уменьшения влияния ослабления сигнала за счет его рассеивания в среде. Доступны два режима: автоматическое и ручное усиление

## Продолжение ТАБЛИЦЫ А.2

Наименование параметра	Значение
<b>Подменю «Положение» (POSITION)</b>	
Режим	Доступно два значения данного параметра: автоматическое и ручное вычисление положения
Смещение	Определяет задержку в нс момента начала записи отраженных сигналов. Необходимо для снижения влияния прямого прохождения из передающей антенны в приёмную
Поверхность	Дополнительная функция дисплея георадара, позволяющая отсечь информацию из "мертвой зоны" прибора, тем самым облегчив интерпретацию результатов исследования
<b>Подменю «Фильтры» (FILTERS)</b>	
Наложение	Необходим для уменьшения влияния высокочастотных шумов на результаты сканирования
Фильтр удаления фона	Позволяет удалять низкочастотные составляющие шумов

В системных параметрах георадара доступны настройки цветовых схем отображения полученных данных. Стандартная настройка включает в себя схему, которая представляет собой совокупность оттенков серого цвета, когда наиболее тёмные участки соответствуют отрицательной полуволне принятого отраженного зондирующего сигнала, а более светлые – положительной полуволне.

Для улучшения наглядности, выявления слабоконтрастных неоднородностей и повышения точности определения их местоположения в исследуемой среде необходимо проводить обработку радарограмм в специальном программном продукте RADAN, входящем в комплект георадара.

Благодаря модульному дизайну программа позволяет пользователю выбирать такие способы обработки, которые необходимы ему для конкретных целей. Данная программа работает на базе операционной системы Windows, обеспечивая пользователей любого уровня знакомой и удобной средой для работы.

Программа RADAN чётко отображает данные, оснащена простым интуитивным экранным меню для облегчения интерпретации данных и для расширения возможностей последующей обработки.

На рисунке А.2 представлено главное окно программы RADAN.

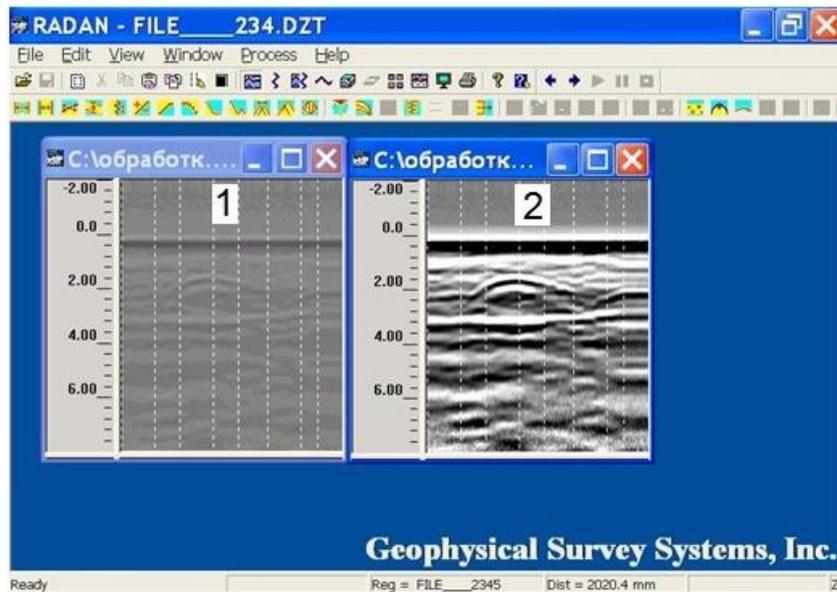


Рисунок А.2 – Главное окно программы RADAN. Представлены радарограммы до (1) и после (2) обработки в программе

При дополнительной обработке экспериментальных данных радарограммы переносятся на компьютер и затем загружаются в программу RADAN. Для повышения разрешающей способности производят увеличение контрастности изображения (с помощью команды «Усилить изображение»). Далее корректируют начало отсчета. После этого проводят анализ обработанного изображения. При необходимости RADAN позволяет применять фильтры высоких и низких частот для исключения влияния помех на результаты эксперимента.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б.**

**Многоканальный измерительный комплекс PULSE:  
технические параметры, комплектация**

Обобщенные характеристики используемой измерительно-вычислительной системы PULSE представлены ниже.

**Функциональные возможности комплекса:**

- Многоканальная обработка данных в реальном масштабе времени;
- Функция цифрового магнитофона;
- Возможность мультианализа;
- Дополнительные функции для постобработки данных;
- Модульная масштабируемая конструкция анализатора;
- Гибкая настройка, возможность внешнего управления и экспорт данных;
- Автоматическое распознавание конфигурации системы;
- Встроенная база данных по акселерометрам и микрофонам;
- Система автоматической калибровки;
- Наличие встроенных обучающих и справочных систем;
- Автоматическое генерирование отчетов в среде Microsoft Office.

**Технические характеристики PULSE:**

Анализаторы серии PULSE (рисунок Б.1) имеют модульную конструкцию и состоят из персонального компьютера (стандартный ПК с сетевой картой 1 Гбит и частотой центрального процессора не менее 1 ГГц или стационарный компьютер); базового программного обеспечения, работающего в среде Microsoft Windows, и использующего Microsoft Office® для генерации отчетов; системного блока и аналогово-цифровых модулей, включающих в себя многоканальный кондиционирующий усилитель и функциональный генератор сигналов. В ее состав входят (рисунок Б.1 а):

- Анализатор БПФ 50 – 6000 линий
- 1/n октавный анализатор 1/1 – 1/24 октавы
- Анализатор суммарного уровня
- Функциональный генератор сигналов: 0,1 Гц – 102,4 кГц
- Цифровой магнитофон
- Частотный диапазон анализа: от 0Гц до 204,8 кГц

- Динамический диапазон: 100 дБ (160 дБ для модулей, изготовленных по технологии DYN-X)
- Погрешность измерений: 0,1дБ
- Число измерительных каналов: от 1 до 1000
- Сетевое, аккумуляторное или бортовое питание.

Для выполнения измерений применялся 12-канальный модуль 3053 (рисунок Б.1 б), который представляет собой конструктивный блок высокой степени интеграции для систем на более чем 60 каналов, который может применяться также в качестве отдельного 12-канального анализатора звука и вибрации, обладающего минимальными размерами.

Для обработки экспериментальных данных применялось программное обеспечение Pulse LabShop Version 10.1.

В качестве акустоэлектрических преобразователей использовались акселерометры KD29 с полосой частот до 20 кГц.

Перед выполнением экспериментальных исследований акселерометры калибровались. Стенд для калибровки представлен на рисунке Б.2.



Рисунок Б.1 – Оборудование для записи акустических сигналов, создаваемых движением пневмоударной машины в грунтовом массиве: а – многоканальная система для анализа акустических сигналов PULSE; б – 12-канальный модуль 3053

Для калибровки акселерометров использовался калибратор 4294 фирмы Брюль и Кьер (Германия). Калибратор акселерометров 4294 – это портативный прибор,

вибростол которого движется с механическими колебаниями строго определенной частоты и амплитуды. Он предназначен для быстрой поверки и градуировки виброизмерительной, виброконтрольной и регистрирующей аппаратуры, в состав которой входят пьезоэлектрические акселерометры и/или другие вибродатчики массой до 70 г.



Рисунок Б.2 – Фотография стенда для калибровки акселерометров: 1 – калибратор 4294; 2 – акселерометры KD29; 3 – милливольтметр ВЗ-57; 4 – усилитель 2635

При проведении калибровки акселерометр закрепляют на столике вибростенда (калибратора 4294), соединяют с контрольно-измерительным оборудованием – милливольтметром ВЗ-57. Включают вибростенд и измеряют напряжение на выходе акселерометра при помощи милливольтметра ВЗ-57. Для измерения чувствительности акселерометров в единицах  $\text{пК/м}\cdot\text{с}^{-2}$  использовался усилитель 2635. Результаты измерений чувствительности всех акселерометров, используемых при экспериментах, в единицах измерений  $\text{мВ/м}\cdot\text{с}^{-2}$  и  $\text{пК/м}\cdot\text{с}^{-2}$  представлены в таблице Б.1.

ТАБЛИЦА Б.1 – Параметры акселерометров KD29

Номер акселерометра в эксперименте	Номер акселерометра по паспорту	Чувствительность, $\text{мВ/мс}^{-2}$	Чувствительность после калибровки, $\text{мВ/мс}^{-2}$	Чувствительность, $\text{пК/мс}^{-2}$	Чувствительность после калибровки, $\text{пК/мс}^{-2}$
1	8517	2,79	2,43	1,40	1,81
2	8498	3,17	2,80	2,02	2,09
3	8418	2,90	2,55	1,80	1,88
4	6044	3,65	3,15	2,12	2,04
5	3599	3,58	3,05	1,90	1,93

**ПРИЛОЖЕНИЕ В.**

**Табличные и иллюстративные материалы натуральных экспериментов**

ТАБЛИЦА В.1 – Времена задержки акустического сигнала, создаваемого движением пневмоударной машины в грунте, для четырех приемных каналов относительно пятого (с машины) с помощью многоканального комплекса PULSE ( $y = 0$ )

Величина отклонения машины от заданного курса, м (координаты: (x, y, z), м)	Обозначение времени задержки	Время задержки, мс (при обработке сигнала по уровню $0,1 \cdot U_{max}$ )	Время задержки, мс (при обработке сигнала по уровню $0,5 \cdot U_{max}$ )	Время задержки, мс (при обработке сигнала по уровню $0,7 \cdot U_{max}$ )
0 м (0,5;0;0,5)	$t_D$	1,29833	1,55833	1,62033
	$t_C$	2,99833	3,49833	3,60533
	$t_A$	1,38333	1,48433	1,57033
	$t_B$	3,40833	3,77433	3,92033
0,1 м влево (0,4;0;0,5)	$t_D$	1,65633	1,88233	1,93033
	$t_C$	3,39333	3,80733	3,89933
	$t_A$	1,12333	1,39103	1,45933
	$t_B$	3,09333	3,37533	3,52933
0,2 м влево (0,3;0;0,5)	$t_D$	2,07613	2,18833	2,33553
	$t_C$	3,17913	3,79833	4,00133
	$t_A$	0,72913	1,18533	1,24333
	$t_B$	2,82713	3,41133	3,53833
0,1 м вправо (0,6;0;0,5)	$t_D$	–	1,45833	1,51243
	$t_C$	–	3,56538	3,68843
	$t_A$	–	2,18433	2,24843
	$t_B$	–	3,77833	3,87943
0,2 м вправо (0,7;0;0,5)	$t_D$	–	1,09533	1,10733
	$t_C$	–	3,39133	3,46333
	$t_A$	–	2,44933	2,49633
	$t_B$	–	4,25433	4,32733

ТАБЛИЦА В.2 – Рассчитанные скорости распространения акустического сигнала в грунтовом массиве ( $y = 0$ )

Обозначение скорости	Расчетные значения скорости распространения акустического сигнала, при обработке по уровню $0,1 \cdot U_{max}$ , м/с	Расчетные значения скорости распространения акустического сигнала, при обработке по уровню $0,5 \cdot U_{max}$ , м/с	Расчетные значения скорости распространения акустического сигнала, при обработке по уровню $0,7 \cdot U_{max}$ , м/с
$V_A$	511	476	450
$V_B$	359	324	312
$V_C$	408	350	339
$V_D$	544	453	436

ТАБЛИЦА В.3 – Измеренные времена задержки акустического сигнала, создаваемого движением машины в грунте, для четырех приемных каналов относительно пятого (с машины), при  $y = 250$  мм; средство измерения – многоканальный комплекс PULSE

Величина отклонения машины от заданного курса, м; (координаты: (x, y, z) в м)	Обозначение времени задержки	Время задержки, мс
0 м (0,5;0,25;0,65)	$t_D$	2,441667
	$t_A$	2,136667
	$t_B$	4,556667
	$t_C$	4,862667
0,05 м влево (0,45;0,25;0,65)	$t_D$	2,315667
	$t_A$	1,998667
	$t_B$	4,490667
	$t_C$	4,874667
0,1 м влево (0,4;0,25;0,65)	$t_D$	2,617667
	$t_A$	1,896667
	$t_B$	4,346667
	$t_C$	5,151667
0,15 м влево (0,35; 0,25;0,65)	$t_D$	2,703667
	$t_A$	1,843667
	$t_B$	4,324667
	$t_C$	5,398667
0,05 м вправо (0,55; 0,25;0,65)	$t_D$	1,979667
	$t_A$	2,136667
	$t_B$	4,562667
	$t_C$	5,402667
0,1 м вправо (0,6; 0,25;0,65)	$t_D$	1,951667
	$t_A$	2,211667
	$t_B$	4,582667
	$t_C$	4,852667
0,15 м вправо (0,65; 0,25;0,65)	$t_D$	2,009667
	$t_A$	2,487667
	$t_B$	4,387667
	$t_C$	4,837667

ТАБЛИЦА В.4 – Рассчитанные скорости распространения акустического сигнала в грунтовом массиве (координата  $y = 250$  мм)

Обозначение скорости	Расчетные значения скорости распространения акустического сигнала, м/с
$V_A$	401
$V_B$	244
$V_C$	229
$V_D$	351

ТАБЛИЦА В.5 – Времена задержки поступления акустического сигнала, создаваемого движущейся в грунте пневмоударной машиной, в приемники многоканальной акустической измерительной системы относительно опорного сигнала непосредственно с самой машины (координата  $y = 250$  мм)

Величина отклонения машины от заданного курса, м (координаты: (x, y, z) в м)	Обозначение времени задержки	Время задержки, мс
0,00 м (0,50; 0,25;0,65)	$t_D$	2,7803
	$t_C$	5,3423
	$t_A$	2,3813
	$t_B$	4,8593
0,05 м влево (0,45; 0,25;0,65)	$t_D$	2,5682
	$t_C$	5,3192
	$t_A$	2,3687
	$t_B$	4,8677
0,1 м влево (0,4; 0,25;0,65)	$t_D$	2,8448
	$t_C$	5,5313
	$t_A$	2,3813
	$t_B$	4,8383
0,15 м влево (0,35; 0,25;0,65)	$t_D$	2,0344
	$t_C$	4,4704
	$t_A$	1,0474
	$t_B$	3,7774
0,05 м вправо (0,55; 0,25;0,65)	$t_D$	2,3246
	$t_C$	5,5271
	$t_A$	2,2931
	$t_B$	4,5086
0,1 м вправо (0,6; 0,25;0,65)	$t_D$	2,1230
	$t_C$	5,4725
	$t_A$	2,9735
	$t_B$	5,3675
0,15 м вправо (0,65; 0,25;0,65)	$t_D$	2,1923
	$t_C$	5,3633
	$t_A$	3,2633
	$t_B$	5,0693

ТАБЛИЦА В.6 – Рассчитанные скорости распространения акустического сигнала в массиве ( $y = 250$  мм)

Обозначение скорости	Расчетные значения скорости распространения акустического сигнала, м/с
$V_A$	302
$V_B$	360
$V_C$	233
$V_D$	302

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г.**

**Документы, разработанные в рамках выполнения диссертации**

ООО "Регион Строй - Монтаж"  
 Юридический адрес: 633560, НСО, р.п. Маслянино, ул. Партизанская, д. 45  
 ИНН/КПП 5431208500/543101001  
 Р/с № 40702810509170000085 В БАНК "ЛЕВОБЕРЕЖНЫЙ" (ОАО)  
 БИК 045017834, К/с № 3010181010000000834

Утверждаю  
 директор  
 ООО "Регион Строй - Монтаж"  
 В.В. Ведянин



2013 года

**АКТ**  
**опытно-промышленных испытаний**  
 применимости Методики георадиолокационного обследования

«18» июня 2013 года

г. Новосибирск

Комиссия, в составе:

Председатель	Директор ООО "Регион Строй -Монтаж"	В. В. Ведянин
Члены комиссии	н.с. лаборатории повышения устойчивости оснований ИГД СО РАН, к.т.н.	А. С. Кондратенко
	Главный инженер ООО "Регион Строй -Монтаж"	С. М. Шулепов
Секретарь комиссии	с.н.с. лаборатории горной геофизики ИГД СО РАН, к.т.н., доцент	Е. В. Денисова

назначенная приказом ООО "Регион Строй -Монтаж" от 13.06.2013 № 21/опи, провела опытно-промышленные испытания (далее - испытания) применимости методики георадиолокационного обследования участка породного массива на наличие в нем механических неоднородностей (далее - Методика). Место проведения испытаний – г. Новосибирск.

**ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ**

1. Провести обследование участка грунтового массива георадиолокационным методом на наличие в нем механических неоднородностей на глубинах до 2500 мм.
2. На основании георадиолокационного обследования рекомендовать участок грунтового массива, вдоль которого на глубине до 2500 мм отсутствуют механические неоднородности, наиболее подходящий для проходки горизонтальной скважины для подведения водопровода к малоэтажному строению бестраншейным способом.

**ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЙ**

Методика георадиолокационного обследования участка породного массива на наличие в нем механических неоднородностей предназначена для предварительного обследования участков массивов горных пород (как скальных, так и грунтовых) перед проведением буровых работ для исключения попадания ствола проходимой скважины в места локализации механических неоднородностей, присутствующих в породном массиве. В соответствии с Методикой проводится георадиолокационное обследование участка породного массива с помощью специального прибора –

георадара. Методика регламентирует порядок применения георадара, а также настройки параметров прибора, обеспечивающие достоверные результаты обследования.

**Аппаратура для проведения испытаний:**

- георадар SIR-3000;
- антенный блок с центральной частотой 400 МГц.

**ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ**

В процессе опытно-промышленных испытаний, руководствуясь Методикой, было проведено георадиолокационное обследование участка грунтового массива длиной 15 м и шириной 4 м, вдоль которого предполагалось пройти горизонтальную скважину для подведения к малоэтажному строению водопровода бестраншейным способом.

Использовался георадар SIR-3000 с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. В соответствии с Методикой на обследуемом участке грунта была нанесена координатная сетка, необходимая для корректной локализации обнаруженных неоднородностей. Глубинность обследования при использовании антенного блока с центральной частотой 400 МГц составляет до 5 м (в соответствии с инструкцией по эксплуатации). Настройки георадара выставлены в соответствии с Методикой. Затем проводилось последовательно горизонтальное георадарное сканирование с «продольной» и «поперечной» ориентацией антенны. Обнаруживаемые в процессе сканирования механические неоднородности фиксировались на поверхности грунта.

После окончания обследования участка грунтового массива была составлена карта локализации механических неоднородностей и рекомендован участок грунта, вдоль которого отсутствуют механические неоднородности. Этот участок был рекомендован как наиболее подходящий для бурения в нем горизонтальной скважины.

**ВЫВОДЫ**

3.1. Задачи испытаний выполнены в полном объеме.

3.2. Методика георадиолокационного обследования участка породного массива на наличие в нем механических неоднородностей обеспечивает обнаружение механических неоднородностей вдоль обследуемого участка грунтового массива.

3.3. На основании анализа результатов георадиолокационного обследования, выполненного в соответствии с Методикой, составляются карты локализации механических неоднородностей на участке обследуемого породного массива, на основании которых даются рекомендации по выбору места, наиболее подходящие для проходки горизонтальных скважин для прокладки подземных коммуникаций бестраншейным способом.

3.4. Применение Методики позволяет исключить попадание в забой скважины механических неоднородностей.

Председатель комиссии

В. В. Ведянин

Члены комиссии

А.С. Кондратенко

С. М. Шулепов

Секретарь комиссии

Е.В. Денисова

СОГЛАСОВАНО  
 Главный инженер  
 ООО «Регион Строй – Монтаж»



С.М. Шулепов

«07» августа 2014 года

УТВЕРЖДАЮ  
 Зам. директора ИГД СО РАН по  
 научной работе, д.т.н., профессор



А.А. Еременко

«02» августа 2014 года

## МЕТОДИКА

### ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КРЕПИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА НАЛИЧИЕ В НЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Ответственный исполнитель:

Младший научный сотрудник

А.П. Хмелинин

Новосибирск, 2014