Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

На правах рукописи

ЖУКОВ Александр Анатольевич

АДАПТАЦИЯ МЕТОДОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

(на примере Верхнекамского месторождения солей)

Специальность 25.00.10
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор геолого-
минералогических наук,
профессор Б.А. Спасский

Пермь – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….. 4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ…….…..... 10
1.1. Общие сведения о геологическом строении ВКМС …….…... 10
1.2. Современная методика обследования бетонной крепи..... 17
1.2.1. Общие сведения о шахтных стволах ВКМС……. 17
1.2.2. Причины и виды нарушений бетонной крепи……....…… 22
1.2.3. Анализ результатов применения геофизических методов для диагностики бетонной крепи……..…….. 32
1.3. Сопровождение горных работ геофизическими методами……... 35
1.3.1. Геофизические технологии, применяемые в настоящее время... 37
1.3.2. Предпосылки применения георадиолокации…… 37
2. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЕТОННОЙ КРЕПИ СТВОЛОВ ВЫПОЛНЕННАЯ НА БАЗЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ……...… 39
2.1. Обоснование конструкции и строительство модели сегмента бетонной крепи……...……..…… 40
2.2. Геофизические исследования на модели…… 47
2.2.1. Электроразведка…….…….. 49
2.2.2. Сейсморазведка…… 55
2.2.3. Акустические исследования……..…….…….… 59
2.2.4. Ультразвуковая томография……...…….…… 63
2.2.5. Георадиолокация…...…….….. 71
2.3. Анализ результатов применения геофизических методов……..... 85
3. РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ БЕТОННОЙ КРЕПИ И ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА ШАХТНЫХ СТВОЛОВ…….. 87
3.1. Оценка условий проведения работ, влияющих на качество данных….…….…….… 87

3.2. Адаптация методики наблюдений методом ультразвуковой томографии…….……..... 94
3.3. Адаптация оборудования и методики наблюдений метода георадиолокации…….. 98
3.4. Анализ результатов опытных работ в действующем стволе рудника СКРУ-3…….……..... 104
3.5. Технология диагностики бетонной крепи шахтных стволов геофизическими методами……..…….…... 110
4. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВКМС…….. 116
4.1. Методика проведения полевых работ……. 117
4.2. Опытные работы по определению скорости распространения электромагнитных волн в солях……..……..… 119
4.3. Опытные работы по определению эффективной глубины проникновения электромагнитных волн в солях……..…… 128
4.4. Опытные работы по определению местоположения выработки……. 132
4.5. Оценка применимости георадиолокации в условиях ВКМС…….. 134
5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА ВКМС……..…... 137
5.1. Возможность раннего обнаружения областей заколообразования в кровле горных работок…… 137
5.2. Оценка динамики изменения физико-механических свойств целиков и междупластий…….……... 139
5.3. Контроль параметров в процессе проходки горных выработок……. 141
5.4. Оценка полноты закладки горных выработок……... 144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….. 146
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..……... 148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……..…... 149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований

Безопасность ведения горных работ на калийных рудниках была и остается актуальной задачей, требующей постоянного внимания горно-геологических служб. Если теме разведки месторождений посвящено бесчисленное множество научных исследований и геофизике здесь отводится одна из ключевых ролей, то вопросы безопасной их эксплуатации зачастую решаются без учета возможностей геофизических методов по оценке изменения физико-механических свойств пород.

В первую очередь такая ситуация сложилась в силу уникальности объекта исследований и, как следствие, отсутствия возможности перенести без адаптации методы, нашедшие широкое применение в других областях. Кроме этого, даже методы, успешно применяемые для решения горных задач на калийных месторождениях по всему миру, невозможно просто «скопировать» для их использования в условиях ВКМС.

В первую очередь, это касается метода георадиолокации, который в настоящее время активно применяется на рудниках Канады, Германии, Франции и ряда других стран для изучения внутреннего строения калийного массива [41, 42, 3]. Однако для успешного решения практических задач в конкретных геологических условиях необходимо учитывать два основных момента: первый – характеристики оборудования, второй – электрические параметры изучаемой среды. И если характеристики оборудования достаточно точно определены, то параметры изучаемой среды могут изменяться в очень широких пределах. Именно отсутствие параметрических данных (скорость и предельная глубина распространения электромагнитных волн) является причиной недостаточной эффективности метода георадиолокации при решении практических задач на ВКМС [21]. Определение этих параметров позволит определить круг приоритетных задач, решение которых возможно посредствам георадиолокации в условиях рудников ВКМС.

Второе перспективное направление для применения геофизических методов, это обследование бетонной крепи шахтных стволов. В силу легкой растворимости солей, вопросу состоянию бетонной крепи шахтных стволов на калийных рудниках уделяется особое внимание [26, 24]. Крепь шахтного ствола должна на протяжении всего срока службы не только сохранять свою несущую способность, но и обеспечивать защиту рудника от возможного прорыва подземных вод. Едиными правилами безопасности [10] предусмотрен регулярный визуальный контроль состояния крепи стволов. Применение геофизических методов для исследования состояния бетонной крепи позволит выполнять предупреждающую диагностику, которая даст возможность выявления дефектов на ранней стадии их формирования.

Целью работы является оценка применимости и последующая адаптация современных геофизических методов для решения горно-геологических задач на Верхнекамском месторождении солей.

Основные задачи исследования:

1. Обзор и анализ эффективности основных направлений геофизических исследований, применяемых на ВКМС. Обоснование перспективных направлений применения геофизики для решения горно-геологических задач;
2. Создание модели сегмента бетонной крепи шахтного ствола с наличием дефектов характерных для крепи действующих стволов;
3. Проведение опытных работы по изучению строения модели бетонной крепи геофизическими методами, а также проведение работ в действующем стволе калийного рудника;
4. На основе анализа полученных данных выбор рационального комплекса методов и разработка технологии диагностики бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников;
5. Определение скорости распространения электромагнитных волн в различных типах солей Верхнекамского месторождения;
6. Определение максимальной эффективной глубины проникновения электромагнитных волн разной частоты для солей Верхнекамского

месторождения;

7. На основе анализа полученных данных провести оценку перспективных направлений применения георадиолокации на рудниках ВКМС.

Защищаемые положения:

1. Физическая модель сегмента бетонной крепи, позволяющая выполнить оценку применимости геофизических методов для обследования крепи и закрепного пространства шахтных стволов;

2. Технология диагностики, основанная на методах георадиолокации и ультразвуковой томографии, позволяющая изучать строение бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов;

3. Оценка применимости метода георадиолокации, основанная на определении скорости распространения и максимальной эффективной глубины проникновения электромагнитных волн для солей в условиях естественного залегания, позволившая разработать перспективные направления применения метода на калийных рудниках.

Научная новизна работы:

1. Выполнено физическое моделирование условий, характерных для вертикальных стволов калийного месторождения, включающее в себя как моделирование особенностей внутреннего строения крепи, так и поверхностных условий, оказывающих влияние на проведение геофизических работ;

2. Выполнена оценка применимости современных геофизических методов для изучения крепи и закрепного пространства шахтных стволов, а также изучены основные негативные факторы, оказывающие влияние на результаты наблюдений. Даны рекомендации по их минимизации;

3. Разработана технология диагностики бетонной крепи, основанная на двух взаимодополняющих методах: георадиолокации и ультразвуковой томографии;

4. Уточнены скорость и максимальная эффективная глубина распространения электромагнитных волн разной частоты, характерные для солей Верхнекамского месторождения;

5. На основании результатов выполненных опытных работ доказана возможность применения георадиолокации для решения горнотехнических задач в геологических условиях ВКМС.

Практическая значимость результатов исследований.

1. Разработанная технология позволяет с достаточной оперативностью и качеством оценивать состояние бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов, не нарушая гидроизоляционных свойств бетонной крепи. Данная технология, при её своевременном применении, обеспечит повышение эксплуатационной надежности стволов и рудников в целом;

2. Применение георадиолокации для контроля параметров проходки горных выработок позволит повысить качество руды, поступающей на фабрику, уменьшит разубоживание и увеличит скорость проходки. Кроме того, корректное выполнение требований паспортов проходки положительно повлияет на общую безопасность рудников и защиту их от затопления;

3. Оценка полноты закладки горных выработок методом георадиолокации позволит обеспечить соблюдение адекватных мер охраны на подработанных объектах;

4. Раннее выявление зон трещиноватости и заколообразования в кровле горных выработок посредством применения георадиолокации позволит повысить безопасность горных работ;

5. Выявленные особенности распространения электромагнитных волн указывают на принципиальную возможность установления корреляционной связи между скоростью распространения электромагнитных волн и ненарушенной зоной междукамерного целика или междупластья. Такие результаты позволят разработать технологию оперативного контроля фактической несущей способности междукамерных целиков и междупластий.

Публикация и апробация работы

Основные материалы диссертации опубликованы в 4 печатных работах в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. В 2017 году получен патент 2624799 «Способ комплексной диагностики состояния бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов». Основные результаты исследований и положения диссертационной работы докладывались на конференции «17-я Уральская молодежная научная школа по геофизике (Екатеринбург, 2016)» и Международном научном симпозиуме «Неделя горняка 2016» (Москва, 2016).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Объем работы - 154 страницы текста, включая 82 рисунка, 4 таблицы и список использованной литературы из 57 наименований.

Исходные материалы и личный вклад автора

Диссертация отражает результаты исследований, проводившихся с 2014 года научно-исследовательской лабораторией геофизики «ВНИИ Галургии» под непосредственным руководством автора.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю профессору Б.А. Спасскому за советы и консультации при подготовке диссертации.

Автор благодарен директору «ППИ-Геофизика» А.М. Пригаре за активное участие в проведение исследований, ценные советы в подготовке диссертации и профессиональную помощь при решении поставленных задач.

Автор благодарен директору научной части АО «ВНИИ Галургии» Д.Н. Алыменко за помощь в организации опытных работ и ценные советы по тематики исследований.

В процессе выполнения исследований автор ощущал поддержку со стороны директора по геологии ПАО «Уралкалий» Лукаса Фолькера Ф.К. Полезными были обсуждения производственных аспектов работы с главным

геологом ПАО «Уралкалий» С.В. Глебовым и начальником отдела геофизических исследований ПАО «Уралкалий» С.А. Мироновым. Активное участие в обсуждении достигнутых результатов и проведении работ принимали сотрудники научной части «ВНИИ Галургии» В.В. Тарасов, В.С. Пестрикова, О.В. Иванов, Д.С. Чернопазов, А.В. Глухих, И.Ю. Пушкарева и А.Б. Лымарь. Работе над диссертацией способствовала творческая и доброжелательная атмосфера в коллективе научной части АО «ВНИИ Галургии». Всем указанным лицам автор выражает искреннюю благодарность.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

1.1. Общие сведения о геологическом строении ВКМС

Верхнекамское месторождение солей расположено в пределах Пермского края, главным образом на левобережье р. Камы (рис. 1.1). В административном отношении находится в Чердынском, Красновишерском, Соликамском, Усольском и Добрянском районах, а также на территориях, подчиненных городам Березники, Соликамск и Александровск.

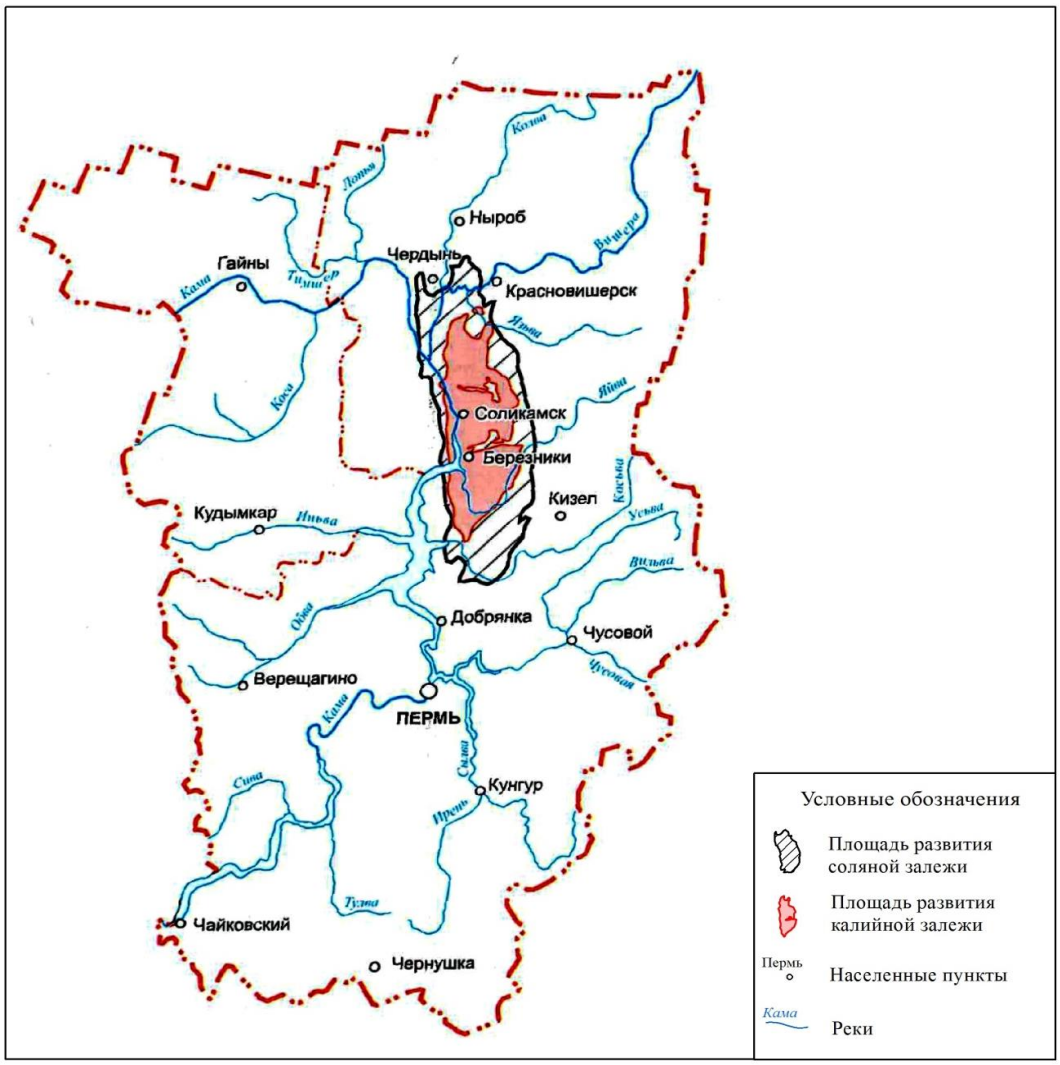


Рис. 1.1. Географическое положение ВКМС

Ниже представлены физико-геологические особенности геологического строения территории ВКМС обобщенные на основе работ [22, 23, 7, 8, 35].

Соляная толща, имеющая форму линзы площадью около 8,2 тыс. км^2,

прослеживается в меридиональном направлении на 206 км, в широтном до 56 км. Внутри контура соляной толщи расположена многопластовая залежь калийно-магниевых солей протяженностью около 140 км, при ширине до 41 км. Площадь основной части калийной залежи по внешнему контуру составляет 3,7 тыс. км^2. Геологические запасы месторождения огромны и оцениваются по карналлитовой породе в 96 млрд. т, по сильвинитам – 113 млрд. т, по каменной соли 4,7 трлн. т.

Главным водотоком является р. Кама, протекающая в западной части месторождения. До широты г. Соликамска сказывается влияние подпора Камского водохранилища. Гидрологическая сеть района представлена, кроме Камы, реками: Колва, Вишера, Язьва, Яйва, Косьва и их притоками. Основной источник питания рек – талые воды, поэтому для рек характерны продолжительный ледостав, высокое весеннее половодье, низкая летняя и зимняя межень.

Стратиграфия и литология. Месторождение представлено солями нижнепермской галогенной формации Соликамской впадины, которая включает отложения карнауховской, березниковской свит и нижнесоликамской подсвиты (рис. 1.2).

Березниковская свита (P_1br) состоит из глинисто-ангидритовой (ГАТ) и соляной толщ.

ГАТ (P_1br_1) сложена мергелями и аргиллитами, доломитами и, в меньшей степени, известняками, ангидритами, каменной солью, алевролитами, песчаниками. Мощность этой толщи изменяется от 145 м (на западе впадины) до 325 м (на востоке), составляя в среднем 230 м.

Соляная толща подразделяется (снизу вверх) на подстилающую каменную соль (ПдКС), калийную залежь и покровную каменную соль (ПКС).

ПдКС (P_1br_2) делится на три пачки (горизонта), отличающихся друг от друга мощностью и количеством пластов терригенно-хемогенных пород. В основании верхней пачки находится пласт «маркирующая глина» (МГ) мощностью от 0,8 до 1,4 м.

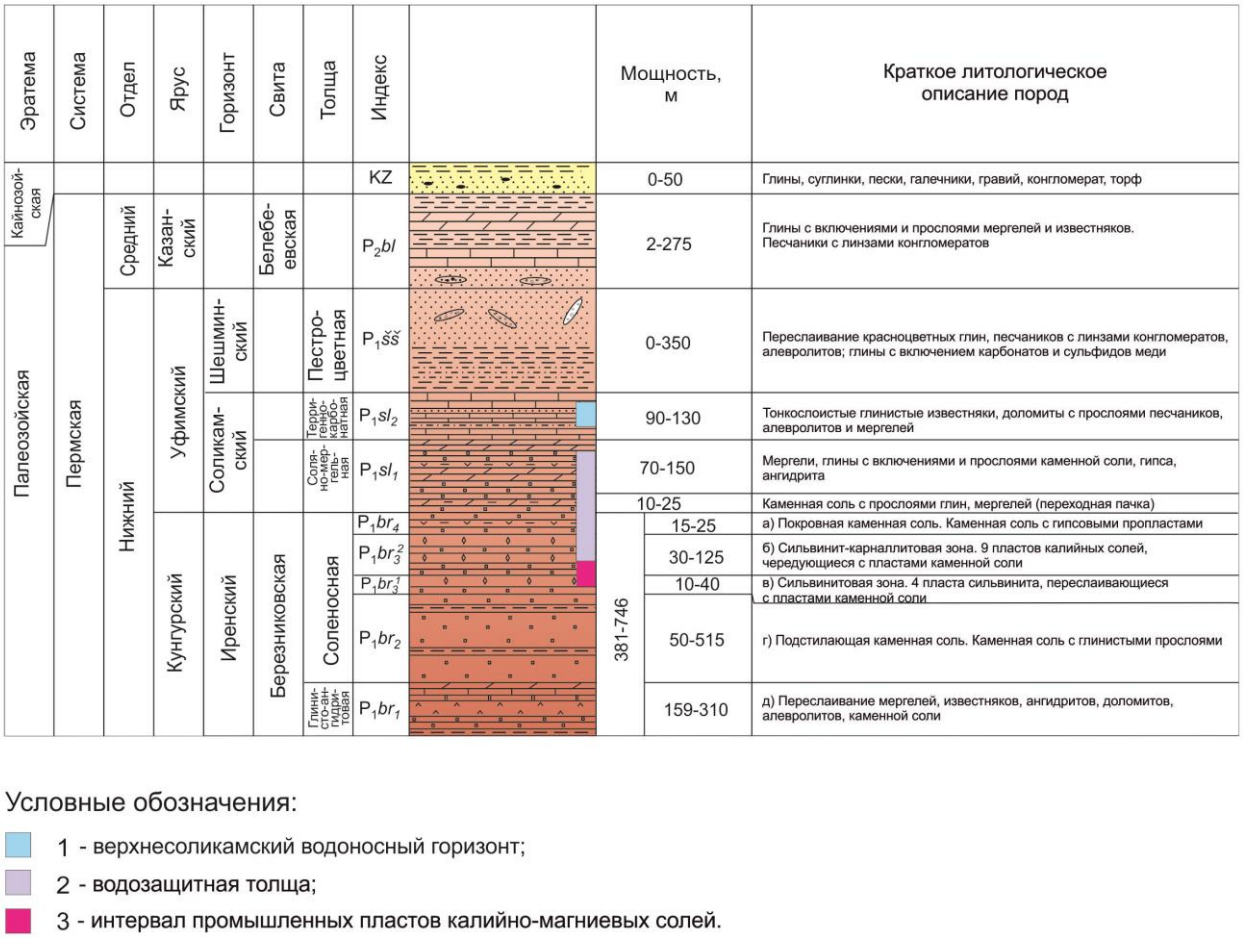


Рис. 1.2. Сводная стратиграфическая колонка района ВКМКС (по материалам Петрик А.И., 2006, с изменениями) [53]

Калийная залежь (P_1br_3) средней мощностью около 72 м представлена серией продуктивных пластов, разделенных каменной солью. По составу продуктивных пластов калийная залежь делится на сильвинитовую и карналлитовую пачки (зоны).

Сильвинитовая пачка (зона) ($P_1br_3^{sil}$) сложена пластами красных (пласты КрIII, КрII, КрI) и полосчатых (пласт А) сильвинитов, отделенных пластами каменной соли (КрII-КрIII, КрI-КрII, А-КрI). Мощность пачки в среднем составляет 17,4 м.

Карналлитовая пачка (сильвинито-карналлитовая зона) ($P_1br_3^{crn}$) сложена чередующимися пластами калийно-магниевых солей, индексируемых снизу

вверх буквами от Б до К, и каменной соли – от Б-В до И-К. Мощность карналлитовой пачки колеблется от 38 до 80 м (средняя – 53,8 м).

ПКС (P_1br_4) мощностью от 16 до 22 м (средняя – 20 м) распространена на преобладающей площади месторождения, но отсутствует на сводах некоторых поднятий.

Нижнесоликамская подсвита (P_1sl_1) представлена соляно-мергельной толщей (СМТ), которая распространена на всей площади месторождения. В разрезе СМТ выделяется девять ритмопачек. Внизу – семь нижних ритмопачек сложены глиной или мергелями, вверху – каменной солью или гипсовой (глинисто-гипсовой) породой. Нижняя часть СМТ, содержащая пласты каменной соли, носит название переходной пачки (ПП). Мощность ПП достигает 88 м, составляя в среднем 20 м. Общая мощность СМТ изменяется от 15 до 160 м и в среднем близка к 100 м.

Галогенная формация перекрывается верхнесоликамской подсвитой (P_1sl_2), которая на месторождении представлена терригенно-карбонатной толщей (ТКТ). ТКТ сложена известняками, доломитами, тонкослоистыми мергелями, аргиллитами, алевролитами, мелкозернистыми песчаниками и известняками. Мощность ТКТ изменяется от 90 до 170 м.

Выше залегает шешминская свита ($P_1šš$), представленная пестроцветной толщей (ПЦТ). Толща сложена песчаниками и алевролитами бурыми, зеленовато-серыми и серыми, иногда с маломощными пропластками мергелей и известняков. В пределах месторождения мощность ПЦТ изменяется от 0 до 675 м. Максимальные мощности приурочены к Дуринской площади.

Разрез венчает комплекс кайнозойских отложений мощностью до 80 м.

Тектоника. В морфоструктурном отношении соляная залежь представляет сложное геологическое тело. При относительно ровной подошве в самой залежи прослеживаются пологие валообразные структуры в основном субмеридионального простирания, осложненные брахиантиклинальными и куполовидными поднятиями, чередующимися с синклинальными прогибами и мульдами (рис. 1.3).

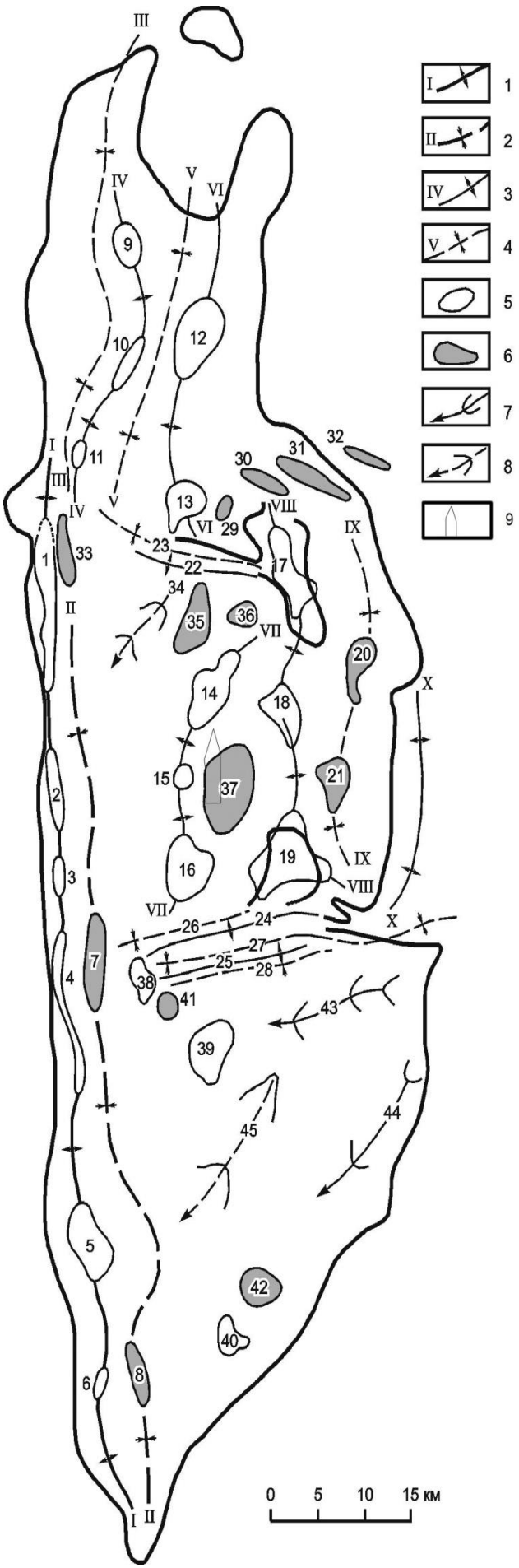
На двух участках (Дуринская и Боровицкая площади) тектонические структуры имеют субширотную ориентировку, кулисное расположение в плане и асимметричные поперечные профили (южные борта прогибов круче северных). Зонами этих структур калийная залежь разделяется на три части: северную, центральную и южную.

Внутри соляной толщи развиты почти исключительно складчатые деформации. По их характеру соляная залежь разделяется на четыре структурных комплекса, каждый из которых охватывает определенную часть разреза [8]. Характерной чертой всех пликативных структур соляной толщи является линейная форма в плане и западная вергентность. Тектонические пликативные формы надсолевых отложений, тесно связанны с рельефом кровли соляной толщи, повторяя его в плавных, сглаженных очертаниях.

Разрывные нарушения на месторождении развиты слабо, среди них наиболее распространены трещины, которые разделяются на открытые и залеченные.

Наличие и характер крупных дизъюнктивных дислокаций (разломов) на месторождении являются предметом острых дискуссий. Одни исследователи полагают, что в его пределах широко развиты крупные разрывные нарушения. Другие считают, что в его пределах развиты только сдвиги и надвиги, причем последние являются основными разрывными структурами месторождения.

В основу идеи надвиговой структуры Соликамской впадины положена концепция «продольного сжатия слоистых литифицированных соленосных толщ», которая в последнее время переименована в «петротектоническую». Основными разрывными структурами Верхнекамского месторождения, по мнению авторов концепции, являются три зоны региональных надвигов: Троицкая, Соликамская и Усольская. Концепция региональных надвигов легла в основу «Указаний по защите рудников…» [35].



1 – валы; 2 – прогибы; 3 – поднятия; 4 – прогибы и синклинали; 5 – купола и брахиантиклинали;
6 – мульды и брахисинклинали; 7 – структурные выступы; 8 – незамкнутые прогибы и синклинали.
I – Камско-Вишерский вал, II – Камский прогиб, III – Губдорский прогиб, IV – Клепиковское поднятие; V – Федюнькинский прогиб, VI – Корельско-Тюлинское поднятие, VII – Соликамское поднятие, VIII – Харюшинское поднятие, IX – Осокинский прогиб, X – Малосурмогское поднятие.

Субширотные валы: 22 – Южно-Боровицкий, 24 – Косиковский, 25 – Ереминский.

Поднятие: 39 – Березниковское.

Купола: 9 – Кузнецовский, 11 – Среднемошевский, 12 – Тюлинский, 13 – Корельский, 14 – Клестовский, 15 – Рудничный, 16 – Поповский, 17 – Потымкинский, 18 – Хаарюшинский, 19 – Пашковский, 38 – Усть-Ленвинский, 40 – Романовский.

Брахиантиклинали: 1 – Дубровская, 2 – Порошинская, 3 – Пыскорская, 4 – Усольская, 5 – Белопашнинская, 6 – Сыньвинская, 10 – Жулановская.

Структурные выступы: 43 – Легчимский, 44 – Еловский.

Прогибы: 23 – Боровицкий, 26 – Усовский, 27 – Гулинский, 45 – Дурыманский.

Синклинали: 28 – Северо-Быгельская, 34 – Чертежная.

Мульды: 29 – Азласская, 35 - Парасинская, 36 – Шубинская, 37 – Тверитинская, 41 – Заячьегорская, 42 – Палашерская.

Брахисинклинали: 7 – Усольская, 8 – Романовская, 20 – Осокинская, 21 – Чуринская, 30 – Тарховская, 31 – Ельникская, 32 – Исток-Боровая, 33 – Нижнемошевская.

Рис. 1.3. Структурно-тектоническая схема ВКМС в пределах калийной залежи [3]

Гидрогеология и карст. На Верхнекамском месторождении выделяют два гидрогеологических этажа: верхний (надсолевой) и нижний (подсолевой), которые разделены водоупорной соляной тощей. Вся надсолевая толща (исключая зону аэрации) насыщена водой, а водоносные комплексы слабо изолированы друг от друга.

По принадлежности к водовмещающим стратиграфическим элементам в надсоляном водоносном комплексе выделяется четыре водоносных горизонта, основным из которых является верхнесоликамский водоносный горизонт. Подземные воды верхней части этажа являются в основном пресными гидрокарбонатными магниево-кальциевыми, кальциево-натриевыми (минерализация до 0,6 г/дм^3). Ниже распространены минерализованные воды, преимущественно хлоридно-сульфатного и сульфатно-хлоридного состава с минерализацией от 1,6 до 14,0 г/дм^3, которые с глубиной сменяются хлоридными рассолами. Граница между пресными и минерализованными водами находится на глубине от 100 до 150 м. Во впадинах кровли солей (мульдах) формируются исключительно рассолы хлоридно-натриевого состава и застойного режима с минерализацией более 50,0 г/дм^3. Основным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки. Области питания совпадают с границами распространения на поверхности земли водоносных подразделений. Формирование региональной гидродинамики верхнего этажа связано с положением гидрогеологических подразделений относительно базисов дренирования (речные долины).

Нижний гидрогеологический этаж представлен слабонапорными застойными минерализованными водами (часто рассолами) и включает серию водоносных комплексов. В подсолевых комплексах преобладают воды Na-Ca и Ca-Na геохимического типа с минерализацией от 200 до 290 г/дм^3. Они отличаются высокой степенью метаморфизации, низкой сульфатностью, обогащенностью бромом (до 2,4 г/дм^3), другими галофильными элементами и редкими щелочными металлами.

Соляные породы повсеместно претерпели постседиментационные

преобразования под действием инфильтрационных вод – от избирательного выщелачивания до полного растворения солей. Границей между карстогенными и соляными породами является соляное зеркало (СЗ). Его абсолютные отметки изменяются от минус 63 до плюс 93 м (Поповский купол).

Таким образом в условиях Верхнекамского месторождения безопасная эксплуатация и защита рудников от затопления надсолевыми водами достигается путем сохранения целостности водозащитной толщи (ВЗТ) над выработками и сохранением герметичности бетонной крепи шахтных стволов. В силу указанных особенностей наиболее рациональным является применение геофизических методов для решения данных задач.

1.2. Современная методика обследования бетонной крепи

1.2.1. Общие сведения о шахтных стволах ВКМС

В предыдущих разделах показано, что месторождение характеризуется сложными гидрогеологическими условиями, поэтому сохранение целостности а, как следствие, и герметичности крепи шахтных стволов на протяжении всего времени эксплуатации является важным фактором обеспечения безопасности действующих калийных шахт. Пластовые калийные месторождения принято подразделять на два класса – с обводненным контактом соляной залежи с надсоляными отложениями и соляными породами, которые не контактируют с обводненными и изолированы от водоносных горизонтов. В первую очередь, именно гидрогеологические условия участка проходки ствола определяют способ его проходки и тип крепи [27].

Так из 24 шахтных стволов ВКМС лишь один ствол № 1 СКРУ-1 был пройден с цементацией околоствольного массива, проходка остальных стволов осуществлялась с замораживанием обводненных пород.

Согласно общепринятой классификации, заимствованной из нескольких литературных источников [26, 56], шахтный ствол калийных рудников, как

инженерное сооружение, можно условно разделить на несколько конструктивных элементов:

– верхняя часть ствола или устье;

– средняя часть;

– нижняя часть ствола;

– зумпф.

Данный перечень достаточно обобщен, поэтому каждый выделенный элемент включает в себя еще множество отдельных составляющих. В связи с этим, следует кратко охарактеризовать каждый отдельный сегмент ствола в подробности, раскрывая основные параметры и характеристики. Пример схемы вертикального ствола с указанием основных элементов, показан на рисунке 1.4.

Устье ствола, как правило, простирается вниз от поверхности земли, до расположения коренных горных пород. В среднем, на ВКМС этот интервал составляет от 10 до 30 м. Глубина заложения устья сравнительно небольшая по отношению к общей длине ствола, но в этом коротком промежутке сосредотачивается множество важных элементов комплекса вертикальной горной выработки, такие как:

- опорные несущие балки копровой рамы;

- воздушные каналы для обогрева воздухоподающих стволов;

- проемы для вывода из ствола технологических трубопроводов и кабельных линий;

- выходы лестничных ходовых отделений из шахты.

Таким образом, конструкция устья одновременно, с одной стороны, является фундаментом рамы станка копра и надшахтного здания, а с другой стороны – формирует прочный железобетонный цилиндр против воздействия окружных сжимающих нагрузок от давления горных пород. Ствол в данном интервале пересекает неустойчивые и достаточно водоносные породы. Поэтому, в качестве основного вида крепления устья ствола, применяется монолитная железобетонная крепь, усиленная внутренним арматурным каркасом. Именно в нижней части устья ствола осуществляется переход от монолитной

железобетонной крепи на чугунную тюбинговую. В указанном переходе закладывается верхний опорный венец, конструкция которого распределяет статическую нагрузку от давления массы элементов устья ствола на горные породы.

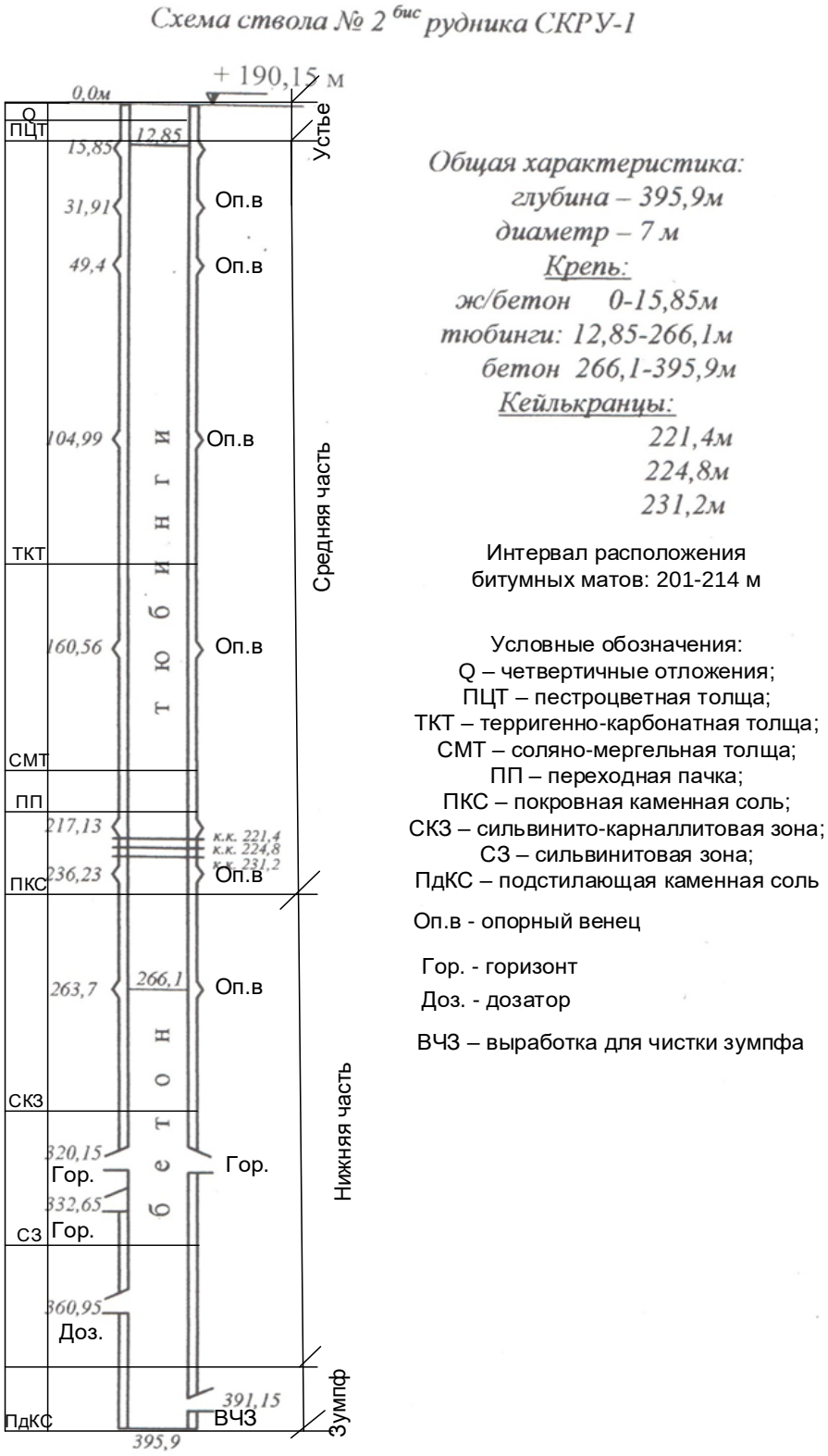


Рис. 1.4. Схема крепи ствола № 2-бис рудника СКРУ-1 [55]

Средняя часть ствола, применительно к условиям ВКМС, в гидрогеологическом отношении подразделяется на два отдельных интервала.

Первый интервал ствола, который пересекает водонасыщенные породы с водопритоками различной интенсивности. На данном участке ствола, для закрепления стенок выработки, применяется чугунная тюбинговая крепь, за которую в пространство между тюбингами и породной стенкой, заливается бетон. Такой вид крепи еще называют комбинированным. Быстрота возведения, достаточная прочность, коррозионная стойкость, оптимальная гидроизоляция – вот тот неполный перечень важных положительных характеристик, благодаря которым комбинированная тюбинговая крепь является безальтернативным видом крепи на рудниках ВКМС в интервале пересечения стволом водонасыщенных пород. Тюбинговая крепь состоит из отдельных элементов – тюбингов, которые собираются в кольца. В свою очередь, тюбинговые кольца собираются в тюбинговую колонну. Высота колонны для каждого ствола различна и напрямую зависит от гидрогеологического состояния вмещающих горных пород. Как правило, тюбинговая колонна имеет несколько промежуточных точек опоры, главной из которых является опорный венец у основания всей тюбинговой колонны. Количество опорных венцов в тюбинговой колонне для каждого ствола неодинаково, но всегда используется принцип равномерного распределения. Для защиты от проникновения подземных вод или рассолов с вышележащих водоносных горизонтов к соляным пластам через комбинированную крепь ствола, устанавливают специальные гидроизоляционные устройства – кейль-кранцы. Применительно к условиям рудников ВКМС в каждом вертикальном стволе устанавливается, как минимум, два таких гидроизоляционных устройства в непосредственной близости от первого опорного тюбингового кольца. Главным критерием выполнения данных условий является размещение основания тюбинговой колонны в прочных, устойчивых породах, являющихся природным водоупором. Практически, здесь же проходит граница между первым и вторым интервалом средней части ствола, где происходит смена тюбинговой крепи, на

монолитную бетонную.

Монолитная бетонная крепь, как правило, сооружается в устойчивых, необводненных, соляных породах, ниже расположения тюбинговой крепи. Для вертикальных стволов калийных рудников толщина бетона в крепи составляет порядка 500 мм. Бетонная крепь, создавая монолитный цилиндр, обеспечивает устойчивое состояние всего комплекса внутренних инженерных конструкций ствола и предохраняет от негативного влияния окружающих горных пород. В свою очередь, бетонная крепь применяется не только в вертикальной части ствола, но и используется в качестве закрепления прилегающих к стволу горизонтальных посадочных, грузовых и вентиляционных выработок, а также дозаторных камер, создавая при этом единое закрепленное пространство, находящегося в нижней части ствола. Весь комплекс различных горизонтальных выработок, прилегающих к **нижней части ствола**, объединяют в так называемый «околоствольный двор».

Количество и варианты размещения прилегающих к стволу горизонтальных горных выработок нижней части, зависит, прежде всего, от функционального назначения ствола. Расположение примыкающих сопряжений в нижней части ствола бывает одно- и двусторонним, как на одной глубинной отметке, так и на разных уровнях горизонтов. Именно в местах сопряжений горизонтальных горных выработок в нижней части ствола, создаются предпосылки для возникновения очагов накопления концентрации напряжений в соляном массиве, которые впоследствии начинают негативно воздействовать на монолит бетонной крепи.

Самой нижней и конечной точкой каждого вертикального ствола является **зумпф.** К зумпфовой части ствола примыкает только одна горизонтальная выработка, которая предназначена не только для чистки самого зумпфа, но и одновременно служит запасным выходом из вертикальной горной выработки. Характерно то, что в условиях рудников ВКМС конструкция крепи зумпфовой части содержит, как правило, три тюбинговых кольца, и далее вверх над кольцами, возводится монолитная бетонная крепь. С точки зрения обеспечения

устойчивого состояния ствола в интервале зумпфовой части, решение о применении двух видов крепи, видится достаточно очевидным и рациональным.

Несмотря на обоснованность и доказанную эффективность такой схемы крепления стволов, имеется ряд причин которые приводят к развитию дефектов в бетоне и нарушению эксплуатационных свойств крепи.

1.2.2. Причины и виды нарушений бетонной крепи.

В результате проведенных исследований [26, 27, 56, 1, 50] и на основе имеющихся в архиве АО «ВНИИ Галургии» литературных данных, было изучено состояние и причины нарушенных шахтных стволов эксплуатируемых на Верхнекамском месторождении.

Анализ выполненных исследований и многочисленных литературных данных, позволил принять классификацию [50], согласно которой все *причины нарушений крепи ствола,* по их происхождению можно разделить на три группы:

- проектные – связанные с неудачными техническими решениями:

1) выбор места заложения ствола и его конструкции (пересечение стволом горно-геологических нарушений вследствие неточности бурения разведочных скважин);

2) недостаточная изученность геологических факторов и их влияние на крепь и армировку ствола;

3) несоответствие качества материалов крепи конкретным условиям её эксплуатации;

4) близкое расположение выработок околоствольного двора относительно друг друга и от ствола;

- горно-геологические и геомеханические – связанные с воздействием сложных горно-геологических условий при проходке и эксплуатации ствола:

1) коэффициент бокового распора ненарушенного массива;

2) воздействие на крепь агрессивных шахтных рассолов, способных привести к коррозии материала крепи;

3) прочностные, деформационные и реологические свойства пород, вмещающих выработку;

4) наличие глинистых прослоев вблизи контура выработки;

- **строительно-эксплуатационные** – включающие в себя последствия технологических нарушений связанных с:

1) некачественным кураторским контролем состояния крепи;

2) последствиями аварийных ситуаций, возникающих за время эксплуатации подъемного комплекса;

3) нарушением технологии возведения крепи и армировки;

4) смещение центра бетонной опалубки (при бетонировании);

5) повышенными динамическими нагрузками при движении подъемных сосудов;

6) оконтуриванием или отработкой предохранительного целика;

7) вынужденной консервацией всего ствола или его части.

Каждая из причин, а также их совокупность проявляются различным образом во времени и на различных участках ствола, соответственно степени влияния каждого из них и значения ряда факторов, определяющих условия поддержания крепи ствола в эксплуатационном состоянии.

Таким образом, крепь ствола разрушается под воздействием различного сочетания химических и физико-механических факторов:

- ***химический фактор,*** или химическая коррозия материала крепи. Основной причиной проявления коррозии, является проникновение за крепь и циркуляция на контакте «крепь ствола - породный массив» высокоминерализованных рассолов способных воздействовать на структуру бетона. Разрушение бетона происходит за счет кристаллизации солей в порах и капиллярах внутри бетона, что с одной стороны приводит к коррозии бетона и дальнейшему его разрушению, с другой – способствует образованию карстовых полостей в закрепном пространстве, вследствие выщелачивания соляного

массива. Чаще всего происходит кристаллизация солей натрия и магния, которая фиксируется на внутренних стенках крепи ствола в виде соляных наростов. В результате такого взаимодействия, коррозионное разрушение бетона крепи агрессивными рассолами наблюдается практически во всех стволах Верхнекамского месторождения.

- ***физико-механическое*** разрушение бетонной крепи, происходит вследствие возникновения односторонних нагрузок. Причиной появления таких нагрузок, как правило, является неустойчивое состояние вмещающих крепь соляных пород, которые склонны к проявлению деформации длительной ползучести, а также за счет изменения характера работы крепи на сопряжениях ствола с околоствольными выработками [1].

Так же следует подчеркнуть негативное влияние совокупности этих двух факторов. Например, с образованием новых трещин в бетонной крепи, появившихся в результате проявления деформаций ползучести соляного массива, происходит увеличение площадей контакта разрушенных участков крепи с агрессивными к бетону рассолами различного генезиса. Затем, при взаимодействии этих рассолов с бетонной крепью происходит коррозия и разрушения цементного камня бетонной крепи, что впоследствии может негативно повлиять на несущую способность всей конструкции ствола.

Многообразие причин и видов нарушений целостности крепи, деформации расстрелов и проводников говорит о том, что значительное количество факторов, влияющих на устойчивость крепи и неоднородность напряженно-деформированного состояния окружающих пород, существенно усложняют выявление основных причин влияющих на разрушение крепи. Так как нарушения крепи происходит в следствии совокупности ряда факторов, а внешними признаки нарушений могут быть общими для нескольких из них, то следует последовательно и обоснованно исключить действие второстепенных причин и выделить основные. Применение неразрушающих методов контроля закрепного пространства и состояния бетонной крепи, к которым в первую очередь следует отнести геофизические методы, позволит значительно

повысить достоверность и однозначность выводов о генезисе нарушений крепи. Но кроме прочего геофизические методы позволяют выявлять нарушения на ранней стадии их формирования. А как известно из практики, поздно выявленные нарушения не только приводят к длительным остановкам работы ствола для проведения ремонтных работ, но и могут быть причинами серьезных аварий.

Ниже приведены примеры нарушения бетонной крепи шахтных стволов описанных в литературе и отчетах о НИР [26, 56, 50, 51].

Например, через 6 лет после окончания проходки ствола № 3 Третьего Березниковского рудника бетонная крепь в соляных породах на участке с 435 до 470 м была раздавлена настолько, что перемещение людей по стволу стало небезопасным. Разрушение крепи произошло из-за «текучести» соляного массива и смещения центра опалубки, допущенного при бетонировании. Последнее привело к тому, что при проектной толщине бетонной крепи 500 мм на отдельных участках в диаметральных точка толщина крепи составляла порядка 200 и 800 мм, это ухудшало условия работы крепи и ускорило ее разрушение. При обследовании и проведении ремонта крепи было установлено, что за северо-восточной, восточной и юго-восточной стенками крепи между бетоном и породой образовались пустоты, гнезда заделки расстрелов в бетон разрушились. В отдельных случаях в радиальном направлении ширина пустот достигла 5–7 м. Причиной образования пустот послужили неучтенные ранее водопритоки.

Ствол № 2 Первого Соликамского калийного рудника. Первое появление течи было отмечено в 1930 году, когда после неудачно проведенного оттаивания ледопородного ограждения через соединительные швы нижних тюбинговых колец и через кирпичную крепь в интервале 131, 51–134 м появился капеж. Дебит притока достигал 1 л/ч. Были проведены работы по чеканке швов тюбинговой колонны, подтяжке болтовых соединений, частично тампонаж закрепного пространства. Капеж прекратился. В 1935 году на том же участке кирпичной крепи вновь появился водоприток. Для ликвидации его

часть кирпичной кладки была разобрана и было установлено, что вода поступает из карналлитового пласта. В нижней части тюбинговой колонны были установлены один келькранец и два тюбинговых кольца. Зоны проявления течи до глубины 152 м протампонировали, общий расход цемента составил 232 т. В последующие годы на этом участке ствола периодически отмечалось появление водопритока, за кирпичной крепью постепенно появлялись пустоты. Борьба с водопритоками велась цементацией закрепного пространства. Всего за первые 20 лет эксплуатации ствола тампонажные работы проводились 6 раз, при этом было израсходовано около 1100 т цемента, общая продолжительность простоя ствола составила около двух лет.

Ствол № 5 СКРУ-2. Начало проходки 1985 г, окончание проходки июль 1988 г. По ряду причин сдача ствола в эксплуатацию была отложена, ствол не был сбит с горными выработками, а с 1996 года был переведен в «режим поддержания» с осуществлением контрольных операций в соответствии с ЕПБ. При проходке выработки для чистки зумпфа (июль 2008 г.), столб воды из зумпфа был спущен в рудник, после чего был выполнен детальный осмотр состояния крепи и закрепного пространства. В результате обследования, выполненного в июле 2008 г. установлено, что за бетонной крепью от зумпфа и на высоту порядка 10–12 м в соляном массиве произошло растворение пластов (в виде горизонтальных линз) глубиной по горизонтали до 8–10 м, общим объемом порядка 400 м^3. Так же была отмечена малая толщина бетонной крепи, которая варьировалась в пределах 150–440 мм. Именно это обстоятельство повлияло на устойчивость бетонной крепи в интервале отметок 194,8–202,8 м, где по южной стенке ствола произошло разрушение крепи в виде вывалов и трещин, с образованием новых заколов [51].

Ствол № 1 БКПРУ-4. Первые признаки нарушения бетонной крепи ствола были зафиксированы через 18–20 лет после окончания строительства. При обследовании ствола в мае 1995 года было установлено, что крепь имеет многочисленные нарушения (рис. 1.5), Толщина бетона в месте заделки бокового расстрела северного скипового отделения – 70 мм. Проверка

фактической толщины бетонной крепи, показала «неравнопрочность» крепи ствола по окружности, результаты замеров – от 150 до 700 мм.

Следует отметить, что для бетонной крепи ствола № 1 наибольшее количество нарушений бетона, не считая выкрашиваний по швам бетонирования, приурочено к интервалу залегания карналлитов (ярусы от № 104 до № 113). Таким образом, бетонная крепь ствола потеряла устойчивость, что впоследствии привело к значительным деформациям кольцевой крепи и, как следствие, к деформированию армировки ствола.

На рисунках 1.6 – 1.8 показаны примеры нарушений бетонной крепи шахтных стволов.

Анализ причин и видов нарушений крепи указывает на то, что подавляющая часть нарушений развивается из закрепного пространства, по этой причине актуальным становится вопрос выполнения предупреждающей диагностики состояния крепи и закрепного пространства неразрушающими геофизическими методами.

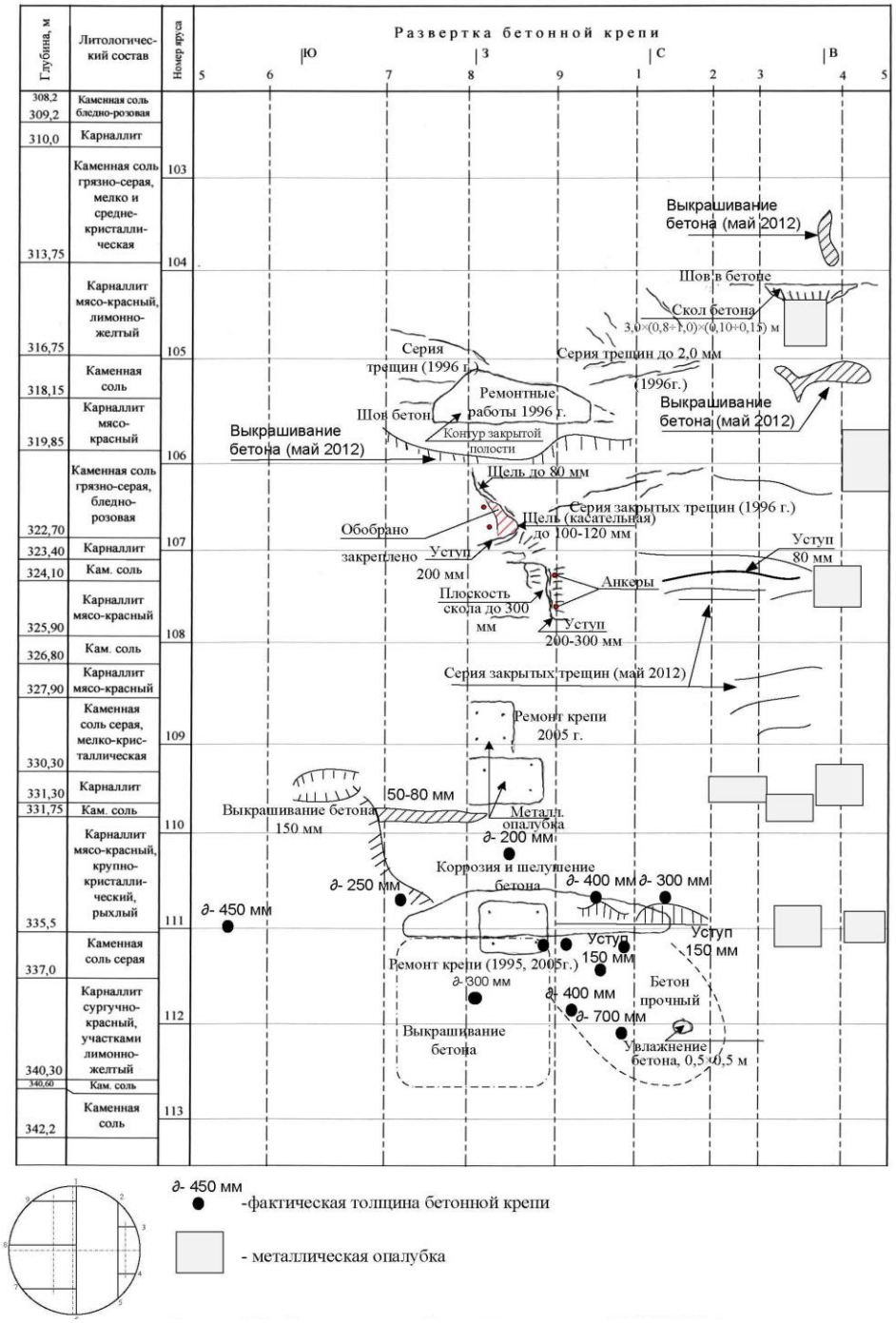


Рис. 1.5. Схема развертки бетонной крепи ствола № 1 БКПРУ-4

Рис. 1.6. Шахтный ствол № 1 рудника БКПРУ-4. Вывал бетона крепи до породной стенки между ярусами № 121 и № 122. 11.05.2012 г. [55]

Рис. 1.7. Шахтный ствол № 5 рудника СКРУ-2. Вид правой кромки (толщины) бетонной крепи после оборки закола в интервале ярусов № 70-71 на восточной стороне ствола (скипового раздела). Толщина бетона крепи (вертикальная светлая полоса по центру снимка) – от 150 мм до 200 мм. Левая сторона снимка – обнаженная поверхность породы (каменная соль), правая сторона – бетонная крепь. Правый верхний угол снимка – заделка восточного центрального расстрела армировки на ярусе № 70 (между клетевым и скиповым отделениями). 06.06.2011 г. [55]

Рис. 1.8. Шахтный ствол № 3 СКРУ-2. Зумпфовая часть ствола на отметка-220. Фрагмент полости размыва (высотой до 1100 мм) каменной соли на уровне почвы северной примыкающей выработки (15.11.2011 г) [55]

1.2.3. Анализ результатов применения геофизических методов для диагностики бетонной крепи

Как было рассмотрено выше, нарушения бетонной крепи могут иметь самый разный генезис и механику проявления. Одни нарушения сразу проявляются на внешней части крепи, другие обнаруживаются только после аварийных ситуаций.

Едиными правилами безопасности [10] предусмотрена систематическая проверка состояния крепи стволов путем визуального осмотра, который позволяет выявлять достаточно крупные поверхностные изменения. Недостаток такого метода заключается в том, что он констатирует только поверхностные изменения, возникшие на видимой части крепи. Отрицательно сказывается так же человеческий фактор (субъективность результатов контроля, степень утомленности контролера) и сильная зависимость от внешних факторов (освещенность, скорость движения подъемных сосудов и т.д.). В отношении мелких нарушений эффективность и достоверность визуального контроля снижается еще больше. Но самый основной недостаток заключается в том, что визуальное обследование не позволяет оценивать внутренние дефекты, а это - не позволяет выполнять предупреждающую диагностику состояния крепи.

На сегодняшний день изучение закрепного пространства эксплуатационными службами горных предприятий осуществляется посредством бурения шпуров. Такой подход имеет два основных недостатка, во первых он нарушает целостность крепи, а во вторых является точечным, что в свою очередь может привести к пропуску дефектов. А именно внутренние дефекты бетонной крепи, возникшие как на стадии строительства, так и эксплуатации ствола, могут приводить к наиболее негативным последствиям, авариям и как следствие длительным остановкам ствола на выполнение ремонтных работ.

Таким образом, безопасность и безаварийность эксплуатации стволов нуждаются в предупреждающей объективной диагностике возможных негативных изменений состояния системы «крепь ствола – массив пород».

Применение методов неразрушающего контроля (МНК), используемых при обследовании мостов и тоннелей оказывается затруднительным по целому ряду факторов:

- субвертикальность профилей обследования;
- наличие соляной корки на стенке ствола, которая может оказывать влияние на данные георадиолокации;
- большое количество металлических конструкций (проводники, расстрелы и т.д.)
- ограничение временного интервала на проведение работ (работы проводятся с подъемных сосудов которые необходимы для нормальной работы шахты);
- низкая освещенность;
- отсутствие нормативной базы по применению МНК в вертикальных горных выработках;
- геологические особенности строения закрепного пространства.

Одной из первых попыток применения акустических методов для изучения закрепного пространства в условиях ВКМС можно считать разработку акустического локатора ЭХО-3М, который был разработан и изготовлен инженерным центром «Радиоэлектроника» по заказу ПАО «Уралкалий» в 1997 году. Однако прибор был выпущен для нужд калийщиков в единичном экземпляре и практически не использовался на предприятии.

Первые современные работы в данном направлении были выполнены ГИ УрО РАН г. Пермь [48, 54, 52, 47, 31]. Авторы разработали методику наблюдений, а так же аппаратуру «IS16M» позволяющую выполнять акустические исследования затюбингового пространства стволов. Опытно-методические работы были выполнены в стволе № 1 БКПРУ-4. В результате работ были выделены границы предположительно приуроченные к физическим акустически жестким границам в конструкции бетонной крепи и ближней зоне закрепного пространства. Определена принципиальная возможность контроля

состояния бетона и прилегающих пород акустическим методом. Однако, авторы отчета отмечали недостаточность полученных данных в виду того, что длина профилей составляла 1,56 м. Дальнейшего развития данная методика не получила, по всей видимости из-за сложностей при проведении полевых измерений.

Первые георадарные исследования [49] были проведены сотрудниками геофизического отдела ПАО «Уралкалий» под руководством Миронова С.А., в 2004 году. Для выявления пустот в закрепном пространстве был применен георадар «RAMAC» с антенным блоком 1 МГц. В результате проведенных исследований была выделена область возможных пустот, однако заверочного бурения проведено не было.

В последующие 10 лет для обследования бетонной крепи георадиолокация не применялась.

В 2014 году в стволе №5 второго соликамского рудника, по инициативе сотрудников ОАО «Галургия» и ООО «ППИ Геофизика» были проведены комплексные геофизические исследования [12]. Целью данных работ стала апробация последних достижений науки и техники для выявления пустот в закрепном пространстве, а также выявление зон развития потенциально-опасных процессов. Комплекс методов включал в себя георадиолокацию с антенной 500 МГц, ультразвуковую томографию с прибором A1040 MIRA производства компании «Акустические контрольные системы», а также тепловизионную съемку. В результате работ было выделено 14 аномальных участков, по котором было проведено контрольное бурение, которое показало, что только 4 из 14 участков имеют аномальное строение закрепного пространства – в одном полость, в других: влажная глина, рыхлая горная порода и влажный бетон.

Обобщая вышесказанное отметим, что в виду отсутствия в нормативных документах указаний по неразрушающему контролю за состоянием эксплуатационные службы горных предприятий крайне редко привлекают специалистов-геофизиков для изучения состояния крепи. А контроль за

состоянием крепи обычно сводится к визуальному осмотру бетона. И в некоторых случаях выполняется шпуровое бурение.

Кроме этого, в настоящее время геофизические методы не адаптированы для проведения исследований в условиях стволов калийных рудников, следствием чего является низкая скорость проведения работ и относительно низкая достоверность получаемых результатов.

Таким образом, необходимо провести оценку применимости современных геофизических методов для решения задач связанных с изучением бетонной крепи и закрепного пространства вертикальных шахтных стволов, определить оптимальный комплекс методов и выполнить их адаптацию к особенностям работ в стволах.

1.3. Сопровождение горных работ геофизическими методами

Обеспечение безопасности горных работ является первоочередной задачей для любого горного предприятия, так как основная ценность это человеческая жизнь. Кроме этого, применительно к месторождениям разрабатываемым подземным способом актуальной является задача сохранности подработанного массива. Выше показано, что ВКМС характеризуется сложными геологическими условиями и главным критерием безопасности для всего рудника является сохранности ВЗТ и недопущение прорыва надсолевых вод в рудничное пространство. За время эксплуатации на ВКМС произошли три крупные аварии, которые связанные с прорывом надсолевых вод в рудники. Первая крупная авария произошла в 1986 году, 11 января из кровли камеры на четвертой западной панели БКПРУ-3 несколькими струйками начал выделяться рассол. Вода, осложняет работу любого рудника, для калийного губительна. И вскоре рассолопроявления были отмечены и в соседних камерах, интенсивность притока рассола увеличивалась с каждым днем. Все предпринятые попытки затампонировать каналы притока, успеха не имели. В результате 23 июля в полости возникшей в результате выщелачивания

взорвался газ и произошло обрушение пород. Что привело к динамическому проседанию земной поверхности, диаметр провальной воронки составил 130 м. Рудник был затоплен полностью. Но провалов земной поверхности больше не образовывалось.

История повторилась в 2006 году, в конце октября был зафиксирован повышенный приток рассола в выработки 4 ЗП БКПРУ-1. Несмотря на все предпринятые меры, спасти рудник не удалось, и он был затоплен.

Третья крупная авария на ВКМС произошла в 2014 году на СКРУ-2, в результате которой в рудник начали поступать надсолевые воды. Усилиями ПАО «Уралкалий» и научных организаций удалось снизить поступление вод в шахту до 100–500 м^3 в сутки. Однако полное затопление рудника, это только дело времени. И последствия этой аварии пока невозможно оценить.

К настоящему времени, наиболее катастрофическими можно считать последствия второй аварии произошедшей на руднике БКПРУ-1. Главным отличием является то, что шахтное поле БКПРУ-1 находится под городом Березники. Вторым важным отличием является время эксплуатации и как следствие объем выработанного пространства. БКПРУ-3 эксплуатировался около 15 лет до момента затопления, СКРУ-2 более 40, а БКПРУ-1 более 70. Через год после затопления БКПРУ-1, 28 июля 2007 года образовался первый провал. В 2010 второй в районе Ж/Д стации г. Березники, в 2011 третий в районе промплощадки БШСУ и в 2015 четвертый в районе школы № 26. Образовавшиеся провалы, а также продолжающиеся процессы оседания подработанного массива привели к нарушению эксплуатационных свойств большого числа зданий и сооружений.

Таким образом, сохранность ВЗТ, контроль состояния подработанного массива и элементов системы разработки было и остается приоритетной задачей на для горных компаний Верхнекамского месторождения. И применение геофизических методов для решения данных задач является наиболее действенным подходом.

1.3.1. Геофизические технологии применяемые в настоящее время

Согласно инструкции по геологическому обслуживанию [18], Геофизические исследований на ВКМС являются частью комплексных геологических исследований, направленных на обеспечение безопасности горных работ на рудниках. Основными задачами геофизических исследований являются:

- выявление аномальных особенностей строения и состава ВЗТ (низкоомных, высокоомных, кинематических и динамических аномалий);
- определение пространственного положения геофизических аномалий;
- оценка и контроль изменения состояния ВЗТ под воздействием горных работ;

Для решения поставленных задач применяется комплекс работ включающий гравиметрические, электрометрический и сейсмоакустические методы. Указанные методы применяются в наземных, подземных и наземно-подземных вариантах. При условии качественного выполнения полевых наблюдений, в совокупности с применением методик комплексирования и соблюдения стадийности, указанные методы исследований часто позволяют решать поставленные задачи [7], которые сводятся к оценке и мониторинговому контролю состояния ВЗТ, что по своей сути является, констатацией уже произошедших изменений в массиве. Кроме этого на ВКМС геофизические методы успешно применяются на контроля физического состояния массива на потенциально-опасных участках и для обнаружения карста на солеотвалах [13, 14]. Однако, геофизические методы имеют гораздо больший потенциал, при решении мониторинговых задач, связанных с обеспечением безопасности горных работ на рудниках ВКМС. И наиболее перспективным методом, которой пока не нашел широкого практического применения, является георадиолокация.

1.3.2. Предпосылки применения георадиолокации

В последнее время георадиолокация все чаще встречается при проведении геофизических исследований. **Георадар** – это современный прибор, применение которого для малоглубинных исследований позволяет получать детальную информацию в относительно короткое время. Что в совокупности и компактностью и мобильностью георадара делают его уникальным среди другого геофизического оборудования.

Известны примеры использования георадиолокации на калийных месторождениях [41, 42, 3, 36, 38]. Можно отметить положительные результаты работ по уточнению местоположения скважин в целиках, обследованию кровли горных выработок с целью выявления зон трещиноватости, опережающая разведка по средствам скважинной георадиолокации и ряд других задач. На рудниках ВКМС, в начале 2000-х годов проводились опытные работы методом георадиолокации [20, 19, 21, 43]. Но не смотря на положительные результаты, на сегодняшний день на рудниках ВКМС, для решения практических задач георадиолокация не применяется. В статье [21] авторы связывают недостаточную эффективность метода в связи с отсутствием параметрических данных для изучаемых пород ВКМС, что в свою очередь не позволяет правильно оценивать возможности метода при решении практических задач. Из практики проведения георадиолокационных работ известно, что для получения надежных результатов при использовании георадара необходимо учитывать два основных момента, первый – характеристики прибора, второй – параметры изучаемой среды. И если характеристики прибора достаточно точно определены, то параметры изучаемой среды могут изменяться в очень широких пределах.

Для ответа на вопрос о применимости метода и возможности его адаптации для конкретных задач, необходимо определить два основных параметра: первый – скорость распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения, второй – максимальная эффективная глубина распространения электромагнитных волн разной частоты.

2. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БЕТОННОЙ КРЕПИ СТВОЛОВ ВЫПОЛНЕННАЯ НА БАЗЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Возможность применения любого геофизического метода, в первую очередь будет определяться наличием контраста свойств между объектом исследований и вмещающими породами. В случае исследования контакта бетонной крепи ствола и прилегающего массива пород, этот контраст будет обеспечиваться разницей физических свойств бетона, соляных пород и полостей с различным заполнителем (воздух, вода, рассол). Из анализа практики применения геофизических методов при решении схожих задач можно получить первое приближение по возможным для применения комплексов. Рассмотрим возможности геофизических методов, для которых существует положительный опыт при решении схожих инженерных задач (обследование тоннелей, мостов, дорог и др.).

В первую очередь отметим, что в силу различных факторов и прежде всего малой разрешающей способности для решения поставленной задачи с практической точки зрения, невозможно применение гравиразведки и магниторазведки.

А основными методами, положительные результаты которых чаще всего встречаются в литературе и статьях, посвященных обследованию бетонных и железобетонных конструкций, являются георадиолокация, сейсмоакустические методы, и, в некоторых случаях, методы электрометрии [33, 4, 39].

Для оценки эффективности применения геофизических методов, позволяющих изучать строения и состояние бетонной крепи, было принято решение о проведении физического моделировании. При моделирование были учтены не только особенности строения реальной крепи, но и выполнена имитация различных неоднородностей в теле крепи и в закрепном пространстве.

2.1. Обоснование конструкции и строительство модели

Главным критерием при создании любой физической модели, является подобие основных свойств созданной модели свойствам реального объекта или среды. Поэтому при создании модели сегмента бетонной крепи, автор опирался на существующие конструкции крепи шахтных стволов верхнекамского месторождения. Размеры неоднородностей и расстояний между ними были подобраны таким образом, чтобы они не выходили бы за пределы разрешающей способности методов. В нашем случае, при создании модели, необходимо отметить два основных аспекта:

1. подобие внутреннего строения модели реальным условиям шахтных стволов (подобие структуры, материалов, а так же моделируемых дефектов реально существующим);
2. подобие внешних факторов, оказывающих влияние не только на получаемые результаты, но и на методику проведения работ (соляная корка на бетоне, армировка ствола, внешние металлические конструкции).

За основу модели была принята двухслойная среда, состоящая из калийной толщи и самой бетонной крепи. Для имитации калийной толщи выбраны солеотходы, получаемые после обогащения сильвинитовой руды. Бетонная часть модели выполнена из бетона той же марки, который используется при строительстве стволов на ВКМС. Мощность соляной толщи изменяется от 10 до 40 см, мощность бетонной от 40 до 80 см. Общий вид модели, а так же ее внутренняя конструкция показаны на рисунках 2.1 – 2.3.

С целью имитации различных неоднородностей в бетонной крепи и закрепном пространстве, решено заложить в модель следующие объекты:

- пластиковые канистры, для имитации пустот и полостей. Канистр 3 штуки, к каждой из которых подведены пластиковые трубки для заполнения водой, рассолом или пульпой, и трубки для слива. Внутренний диаметр трубок 35 мм; канистры заложены на разной глубине: первая в соли, вторая на границе соль-бетон, третья в бетоне;

- арматурные стержни - заложены для привязки данных георадиолокации (железная арматура дает четкие дифракции, что позволит точно перевести временной разрез в глубинный);
- область трещиноватости - создана путем заложения плотной (толщина около 1 мм) полиэтиленовой пленки в бетон;
- деревянные бруски имитирует оставляемые части опалубки;
- «куб бетона» - будет имитировать резкое, локальное увеличение мощности бетона. Создается путем формирования выемки в соли, которая будет заполнена бетоном в процессе заливки;
- теннисные мячи – будут имитировать небольшие полости (диаметр 67 мм). Глубина их заложения в бетоне от 400 до 700мм, количество 5 шт.;
- «Г-образная» полипропиленовая трубка диаметром 25 мм. Трубка заложена по дну модели, с вертикальным поднятием в центре. Через трубку будет подаваться вода, для имитации перетоков воды в закрепном пространстве.

Размеры модели были подобраны таким образом, чтобы заложенные в нее объекты находились друг от друга на расстоянии, соизмеримом с глубиной их залегания, для уменьшения взаимного влияния. Размеры конструкции составили 3,5х3х0,8 м (ДхШхВ).

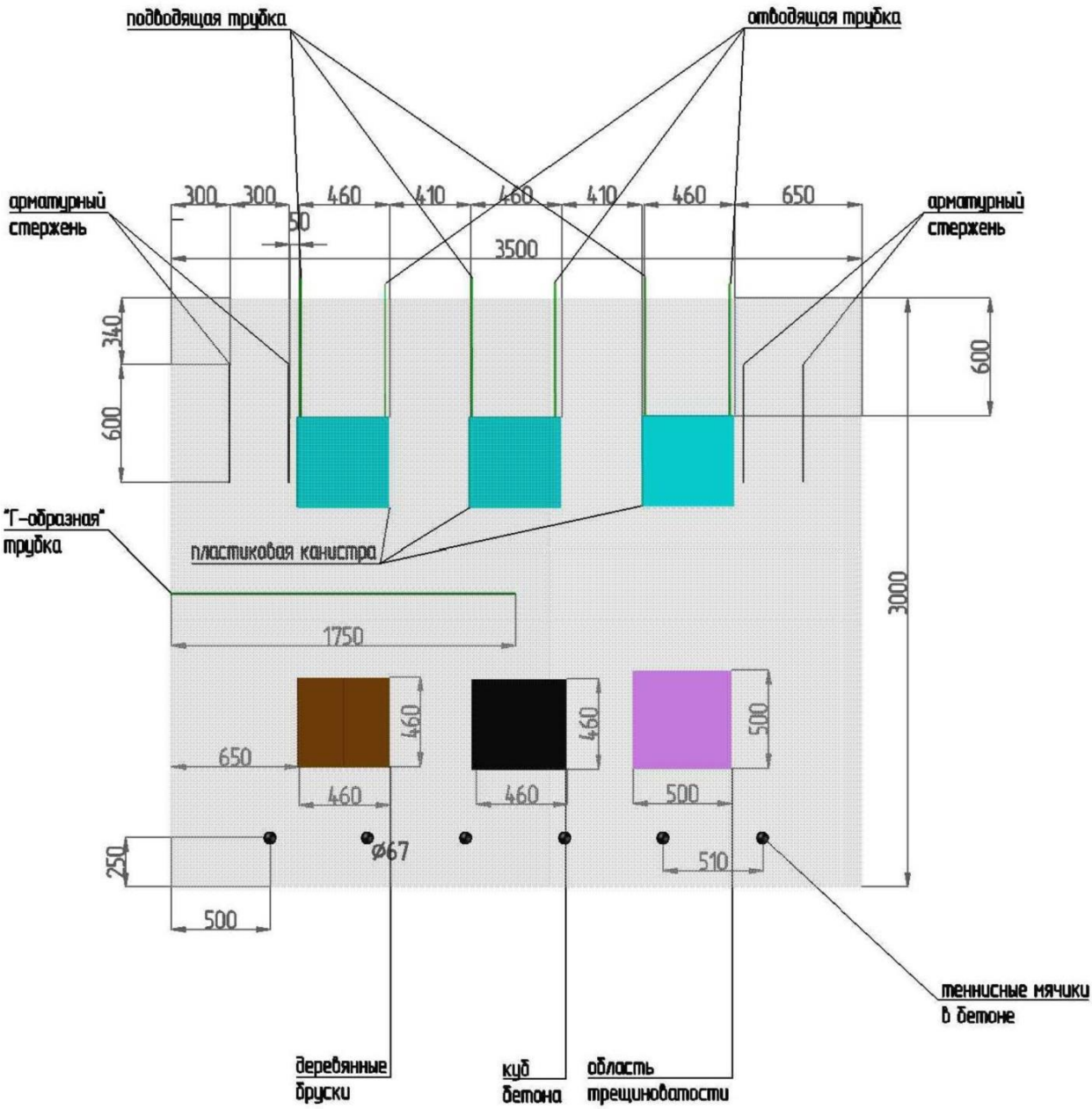


Рис. 2.1. Модель бетонной крепи (вид сверху)

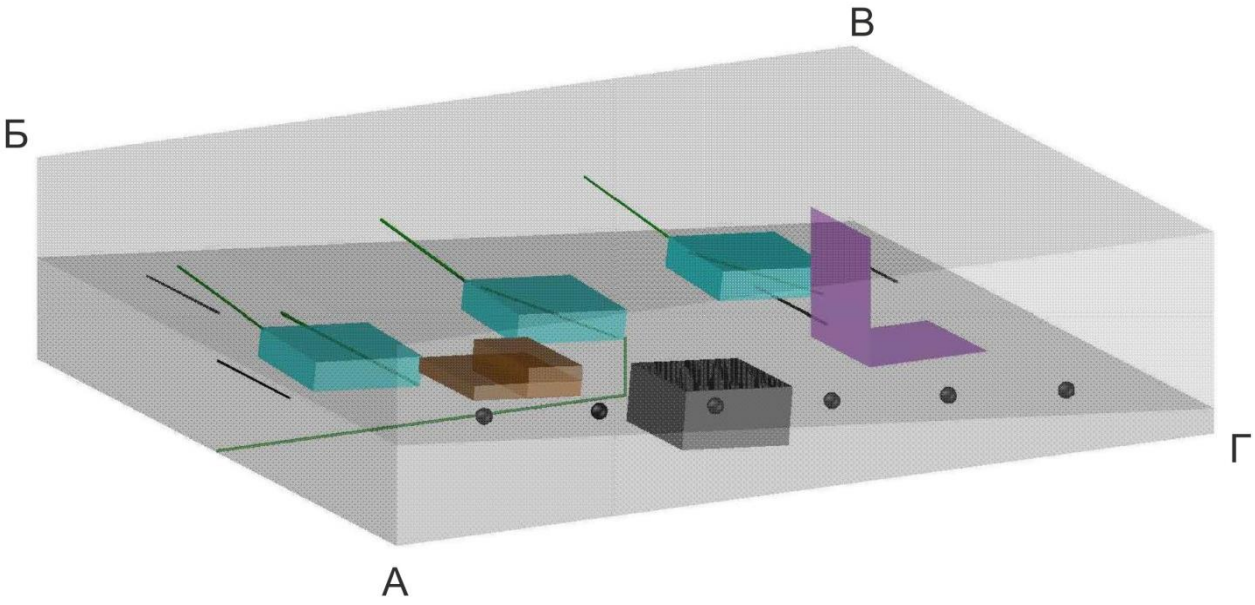


Рис. 2.2. Модель бетонной крепи (вид БАГ)

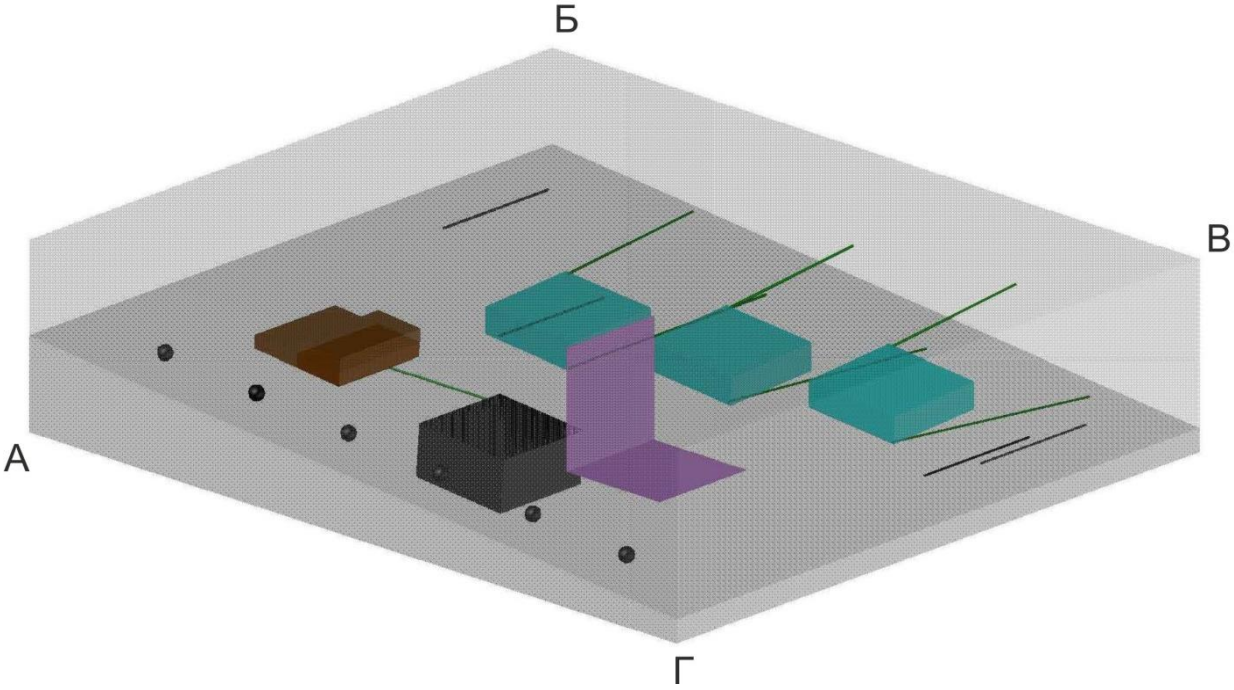


Рис 2.3. Модель бетонной крепи (вид АГВ)

Строительство модели включало в себя следующие этапы:

- возведение опалубки. Для этого из арматуры и металлических уголков был сварен каркас для обеспечения надежности возводимой конструкции, после чего собрана сама опалубка (рис. 2.4).
- на втором этапе начата постепенная засыпка солеотходов и одновременно заложение всех элементов конструкции. К ним относились: якоря, арматурные стержни, а так же «Г-образная» трубка. Область максимального растекания воды от трубки была определена экспериментальным путем и составляла 60 см в диаметре (рис. 2.5). В модели была произведена гидроизоляция области указанных размеров, а так же перфорирование дна для обеспечения оттока рассола (рис. 2.6).
- на третьем этапе были заложены неоднородности (объекты поиска). К ним относились теннисные мячи, деревянные бруски, пластиковые канистры, полиэтиленовая пленка (для имитации области трещиноватости). Кроме этого, для моделирования ситуации с резким увеличением мощности бетона в соли была выполнена выемка размером 0,45х0,45х0,35 м, которая заполнилась бетоном при заливки модели (рис. 2.7).
- четвертым этапом стала заливка модели бетоном. Для заливки потребовалось 6 $м^3$ бетона марки М 300, класса В 22,5. Конечный вид модели показан на рисунке 2.8.

После заливки модели проводились регулярные осмотры модели не предмет протечки ливневых вод в соляную толщу, чтобы исключить растворение солей. Согласно строительным нормам бетон набирает полную прочность в течение 28 суток после заливки. До проведения основных работ прошло около 40–45 суток.

в

Рис. 2.4. Вид опалубки в процессе возведения

Рис. 2.5. Определение области растекания воды через перфорированную трубку

Рис. 2.6. Процесс заполнения модели

Рис. 2.7. Модель крепи с заложенными элементами [16]

Рис. 2.8. Вид модели после заливки бетона

2.2. Геофизические исследования на модели

С целью анализа объективности полученных результатов на модели были опробованы все наиболее распространенные геофизические технологии: электроразведка (гальванический, индуктивный и смешанный варианты аппаратура АМС-1 и Эра-МАКС), сейсморазведка (на продольных волнах, поперечных волнах, сейсмостанции ТЕЛСС-3 и IS-96), акустический метод (акустический локатор ЭХО-3М), ультразвуковая томография (томограф A1040MIRA) и георадиолокация (радар SIR-3000 с набором антенных блоков).

Результаты геофизических исследований [55, 16], проведенных на модели показали, что методы классической сейсморазведки не позволяют решать поставленные задачи в первую очередь из-за малых размеров искомых объектов, не соизмеримых с длинами волн и частотами генерируемых сигналов.

Методы электрометрии позволяют лишь оценивать состояние закрепного пространства (выявлять обводненные участки либо сухие полости), однако обладают низкой помехоустойчивостью, а кроме этого являются чрезвычайно трудоемкими в плане выполнения полевых работ в действующих стволах.

Таким образом, для обследования бетонной крепи шахтных стволов наиболее подходящими являются три геофизических метода: георадиолокация, акустический метод и ультразвуковая томография, о них и пойдет речь дальше.

Для удобства проведения работ на модель была нанесена разметка с шагом 10 см (рис. 2.9). На первом этапе работ возможность использования каждого из применяемых методов определялась в идеальных условиях (на сухой, ровной, чистой поверхности бетона). При получении удовлетворительных результатов и наличии технической возможности их проведения добавлялись неблагоприятные факторы среды, индивидуальные для каждого метода.

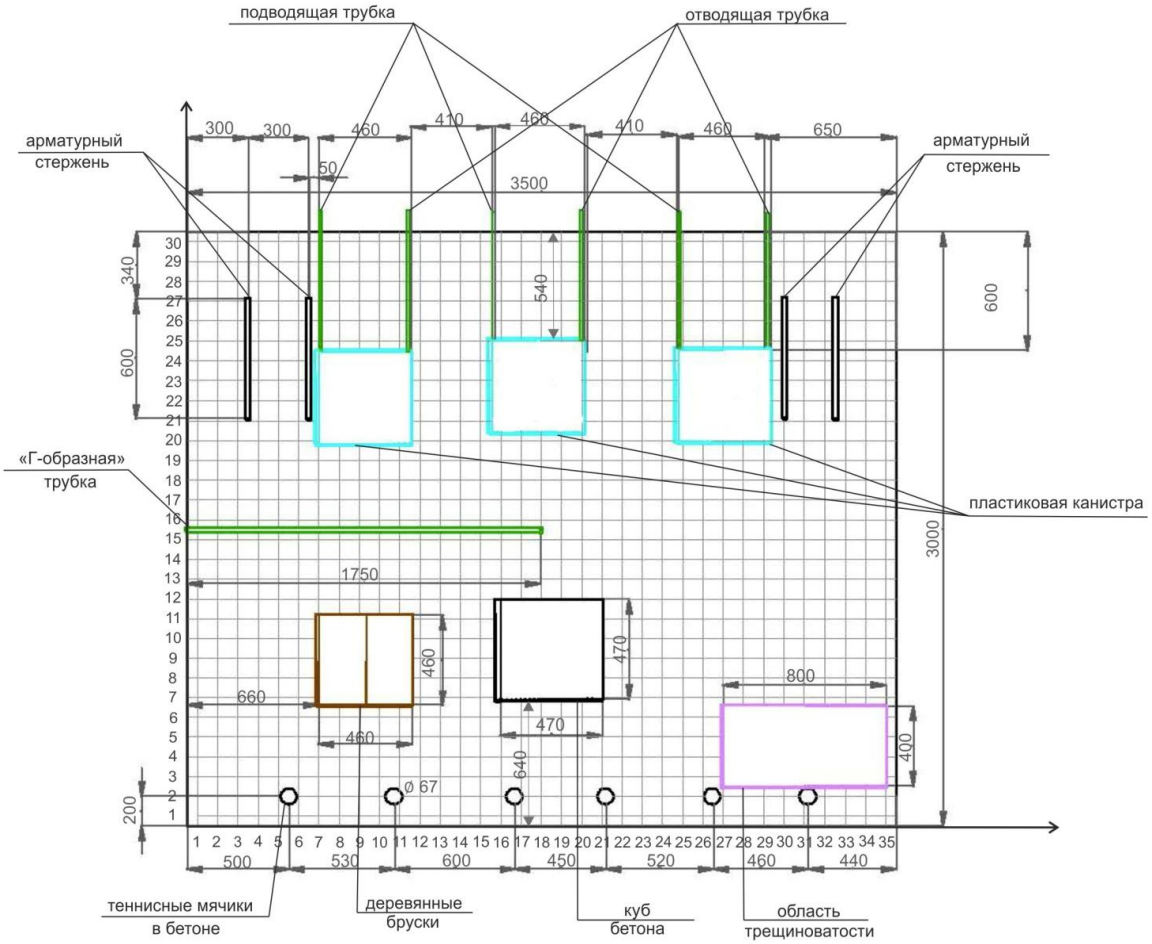


Рис. 2.9. Схема модели (вид сверху)

2.2.1 Электроразведка

Электроразведочные исследования проведены как методом безконтактного измерения электрического поля (БИЭП) так и с применением гальванического способа возбуждения электрического поля.

Методика полевых работ БИЭП

Работы методом БИЭП проводились частично заземленной дипольной установкой, когда ток в изучаемую среду подавался контактным способом, а измерения выполнялись бесконтактным способом. Для измерений использовалась аппаратура Эра-Макс. Питающая линия АВ размером 40 см заземлялась с помощью пропитанных минерализованной водой пористых контактных электродов. Приемная линия представлена стелющимся электродом длиной 20 см. Частота сигнала – 625 Гц, ток – 0.5 мА, количество разносов – 11, минимальный – 0.6 м, максимальный – 2.6 м, изменяются с арифметическим шагом 0.2 м. Всего отработано 10 пикетов, в соответствии с рисунком 2.10.

Методика обработки и интерпретации данных БИЭП

Материалы БИЭП обработаны по методике, используемой для обработки данных ВЭЗ. Данные переведены в формат программы ЗОНД, выполнено сглаживание данных наблюдений и их редакция. Выполнена качественная интерпретация, проанализированы разрезы кажущегося сопротивления (КС) и объемные изображения поля КС. Выделены общие закономерности распределения кажущихся сопротивлений, связанные со строением модели и заложенными в нее неоднородностями.

Результаты работ методом БИЭП

На полученных разрезах и объемном изображении параметра КС в целом, в соответствии с рисунком 2.11, хорошо отображается общее строение модели, а именно – общее уменьшение сопротивления с глубиной, увеличение мощности бетона от профиля 1 к профилю 2.

Так же, в соответствии с рисунками 2.10, 2.11 отмечается понижение сопротивления в центральной части профилей, в направлении от ПК 3 к ПК 8.

Автор связывает этот эффект с отсутствием в центральной части модели каких либо неоднородностей с повышенным сопротивлением, в то время как по краям модели, на началах и концах профилей БИЭП такие неоднородности присутствуют. Низкоомная область на пикете 8 соответствует трещиноватой области, видимой на поверхности бетона.

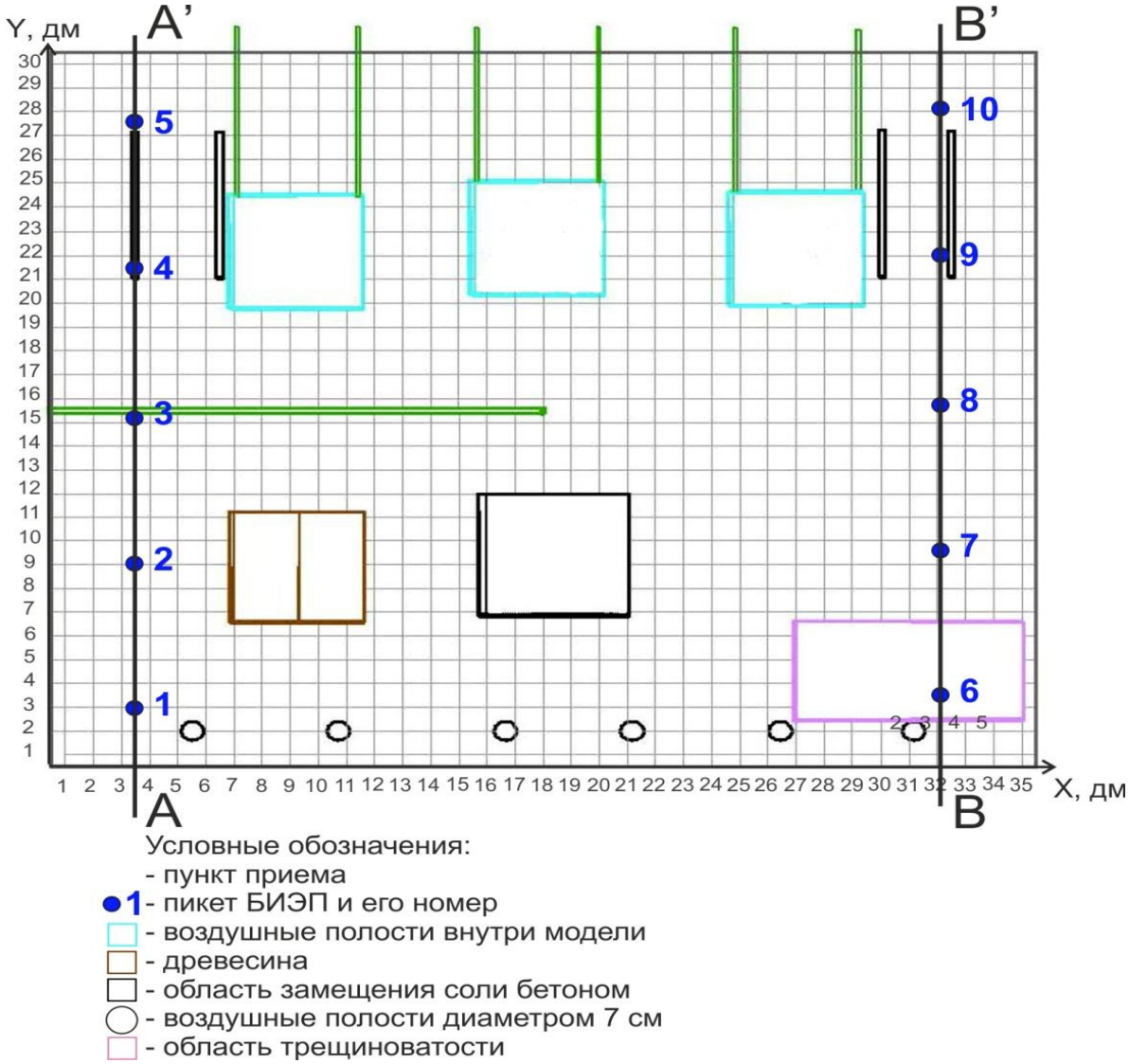


Рисунок 2.10 – Схема работ методом БИЭП

Таким образом, по результатам БИЭП можно сделать следующие выводы:

- метод на качественном уровне позволяет выделять участки увеличения/уменьшения мощности бетона, а при наличии результатов бурения – построить и количественные разрезы или карты мощности бетона;

- по характеру изменению кривых, возможно, оценивать наличие за бетоном высокоомных или низкоомных неоднородностей, ассоциируемых с полостями, заполненными, соответственно, воздухом или рассолом.

С точки зрения применимости в условиях шахтных стволов метод, к сожалению, обладает определенными ограничениями, в том числе, слабой устойчивостью к помехам и низкой скоростью выполнения полевых работ.

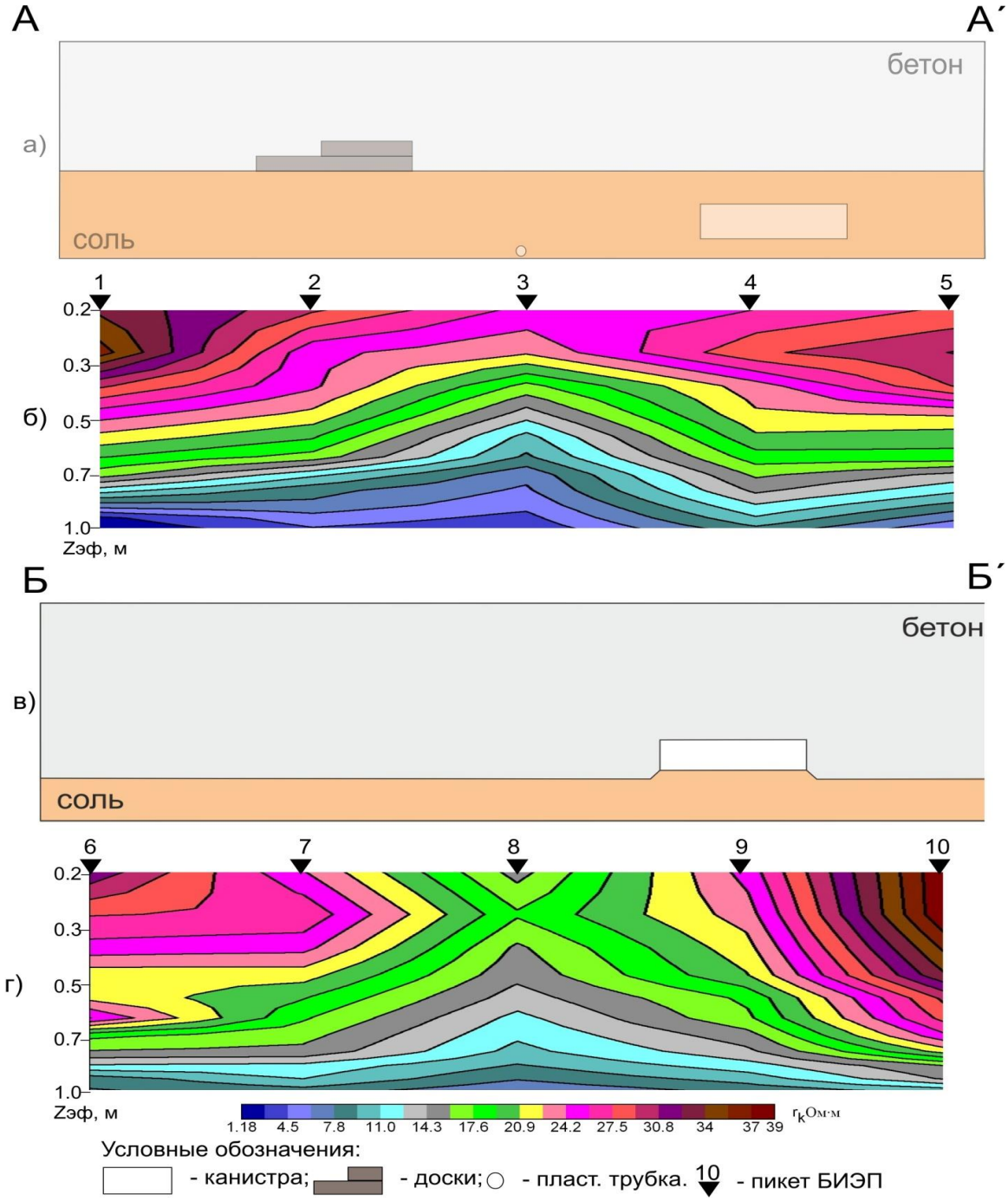


Рис. 2.11 – Разрезы КС для метода БИЭП

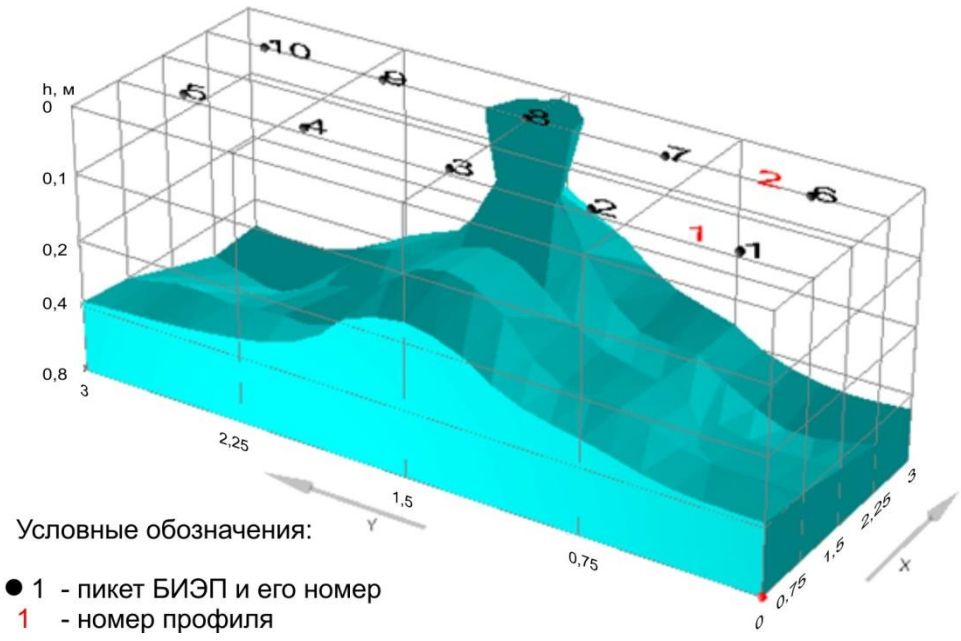


Рис. 2.12 – Тело низких сопротивлений для метода БИЭП, отождествляемое с солевой основой модели. Масштабы по осям не одинаковы

Электроразведочные исследования методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)

Методика полевых работ ВЭЗ

Работы методом ВЭЗ проводились заземленной трехэлектродной установкой, когда ток в изучаемую среду подавался контактным способом электродом А, а электрод В заземлялся от модели на расстоянии, многократно превышающем размеры модели. Для измерений использовалась аппаратура АМС-1. Питающий электрод А и приемная линия MN заземлялись с помощью пропитанных минерализованной водой контактных пористых электродов. Питающий электрод В заземлен в почву обычным стальным электродом. Трехэлектродная установка выбрана из-за ограниченных размеров модели, на практике целесообразнее использовать четырехэлектродную симметричную установку. Длина приемной линии MN составила 50 см. Частота сигнала – 4,88 Гц, ток – 10 мА, количество разносов – 12, минимальный – 0.7 м, максимальный – 2.7 м, изменяются с арифметическим шагом 0.2 м. Всего отработано 25 пикетов, в соответствии с рисунком 2.13.

Методика обработки и интерпретации данных ВЭЗ

Данные переведены в формат программы ЗОНД, выполнено сглаживание и редакция результатов измерений. Выполнена качественная интерпретация, проанализированы срезы кажущегося сопротивления (КС) и объемные изображения поля КС. Выделены общие закономерности распределения кажущихся сопротивлений, связанные со строением модели и заложенными в нее неоднородностями.

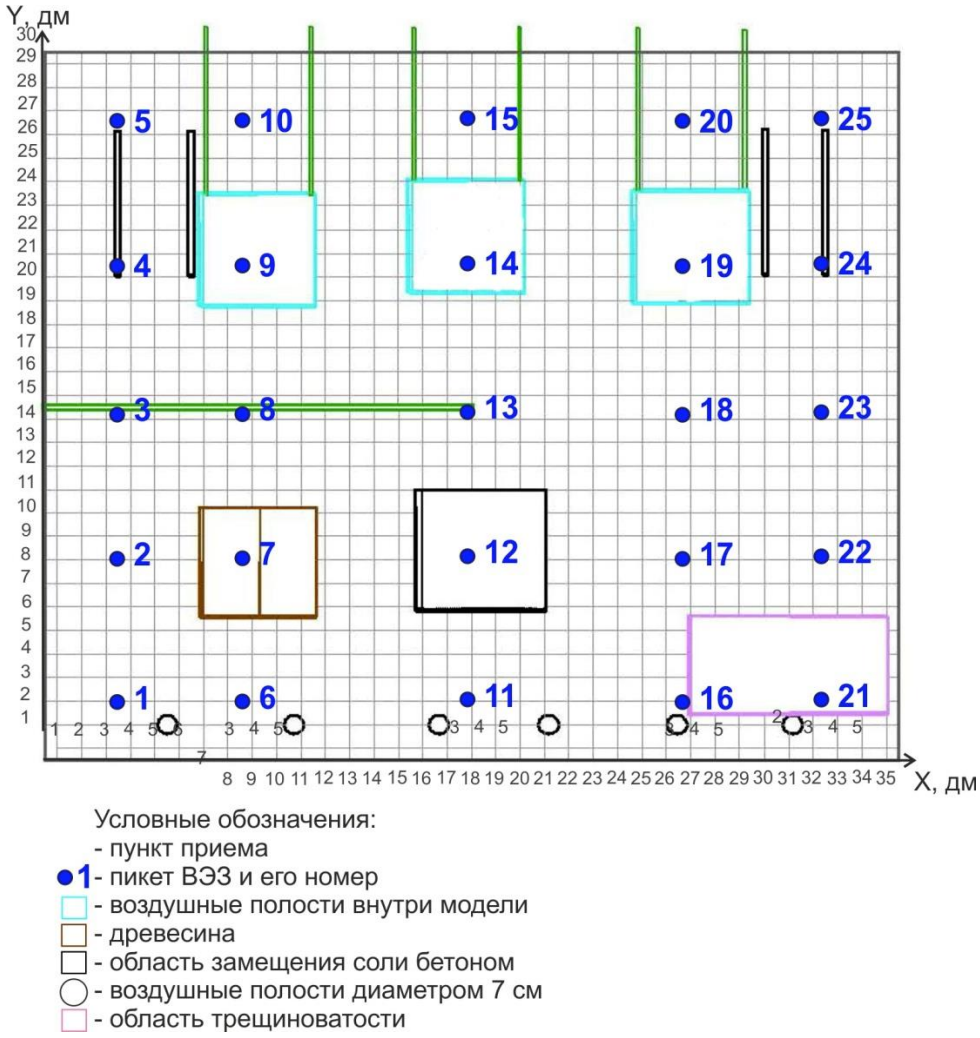


Рис. 2.13 – Схема работ методом ВЭЗ

Результаты работ ВЭЗ

В целом, результаты работ ВЭЗ, в соответствии с рисунком 2.14, аналогичны результатам БИЭП – понижение сопротивления с глубиной, повышенное сопротивление по тем краям модели, где в теле модели присутствуют высокоомные неоднородности.

Основное отличие результатов работ ВЭЗ состоит в том, что не отмечается такого четкого, как по данным БИЭП, увеличения мощности бетона и уменьшение мощности соли.

Таким образом, при обследовании крепи шахтных стволов методы электрометрии позволяют получать интегральную оценку строения закрепного пространства. Однако, достоверное определять детальные параметры аномалий: размеры или глубину неоднородностей по данным электроразведки невозможно, по этой причине метод можно рекомендовать как дополнительный. Кроме этого, в условиях действующих стволов использование методов электрометрии окажется затруднено как с точки зрения выполнения полевых работ, так и из-за большого количества объектов электрических помех.

По совокупности факторов, методы электрометрии можно рекомендовать к применению в шахтных стволах как дополнительные, когда необходима информация по комплексу методов, либо когда нет возможности применить другие.

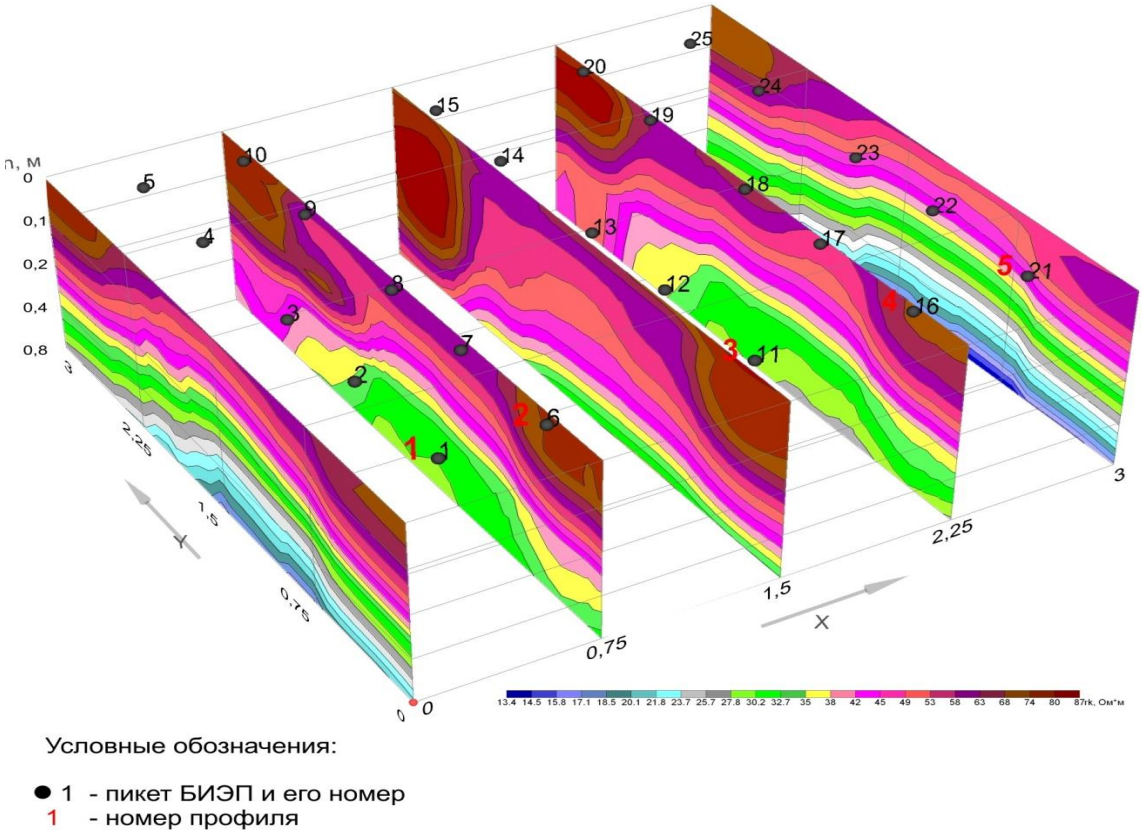


Рис. 2.14 – Срезы кажущегося сопротивления по результатам ВЭЗ

2.2.2 Сейсморазведка

Сейсморазведочные наблюдения методом отраженных волн по методике общей глубинной точки (МОВ ОГТ) с использованием поперечных волн выполнены на поверхности модели. Для полевых наблюдений использованы современные цифровые телеметрические сейсмостанции ТЕЛСС -3(ООО «Геосигнал», г. Москва) и IS-48 (ООО НПП «Интромаг», г. Пермь). Каждой станцией выполнено по 27 физических точек наблюдения.

В качестве источника поперечных упругих волн использовался молоток. Для возбуждения поперечных волн удары выполнялись максимально близко к горизонтальному направлению по прижатому к бетону уголку, перпендикулярно профилю. Число накоплений для возбуждения поперечных волн на каждом ПВ равно четырем. Применена переменная система наблюдений – от фланговой до центральной. Расстояние между пунктами приема ($\Delta X_{пп}$) равно 0,2 м. Расстояние между пунктами возбуждения ($\Delta X_{пв}$) равно 0,4 м. Отработано три профиля, в соответствии с рис. 2.15 длиной по 3,2 м. Количество пунктов приема на каждом профиле 18, количество пунктов возбуждения – 9. Шаг дискретизации 0,25 мс (ТЕЛСС-3) и 0,033 мс (IS-48), длина записи составляет 256 мс.

Методика обработки и интерпретации полевых материалов

Обработка и интерпретация полевых материалов выполнена с помощью программного обеспечения RadExpro и программ собственной разработки. Обработка включала в себя весь стандартный граф обработки материалов МОВ ОГТ, характерный для обработки материалов инженерной сейсморазведки.

Результаты работ МОВ ОГТ

Основным результатом обработки материалов МОВ ОГТ являются глубинные разрезы, в соответствии с рис. 2.16.

На этапе качественной интерпретации, на временном разрезе прослеживаются отражающие границы, отождествляемые с литологическими границами, а так же аномалии, отождествляемые с неоднородностями,

присутствующими в разрезе. На полученных временных разрезах вертикальная шкала соответствует глубинам.

При анализе разрезов, полученных с сейсмостанцией ТЕЛСС-3, становится понятно, что практически ни одна особенность модели на них не отображается. В частности, граница бетон-соль никак не проявляется на профилях 1 и 3, проявляется на профиле 2, но ее наклон не точно соответствует фактическому наклону отражающей границы (см. выше рисунок 3.8).

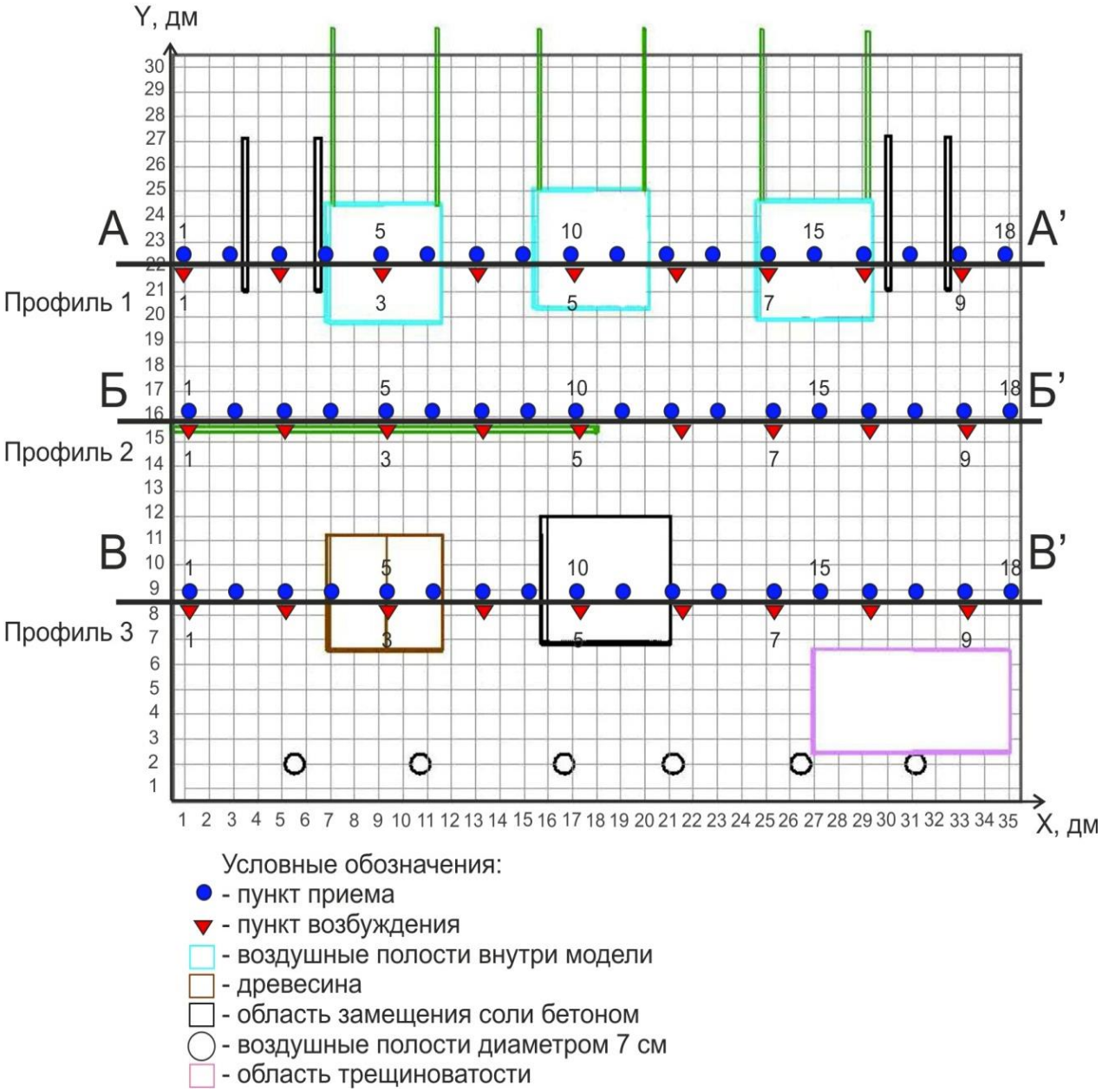


Рис. 2.15 – План фактического материала работ МОВ ОГТ с сейсмостанциями ТЕЛСС-3 и IS-48

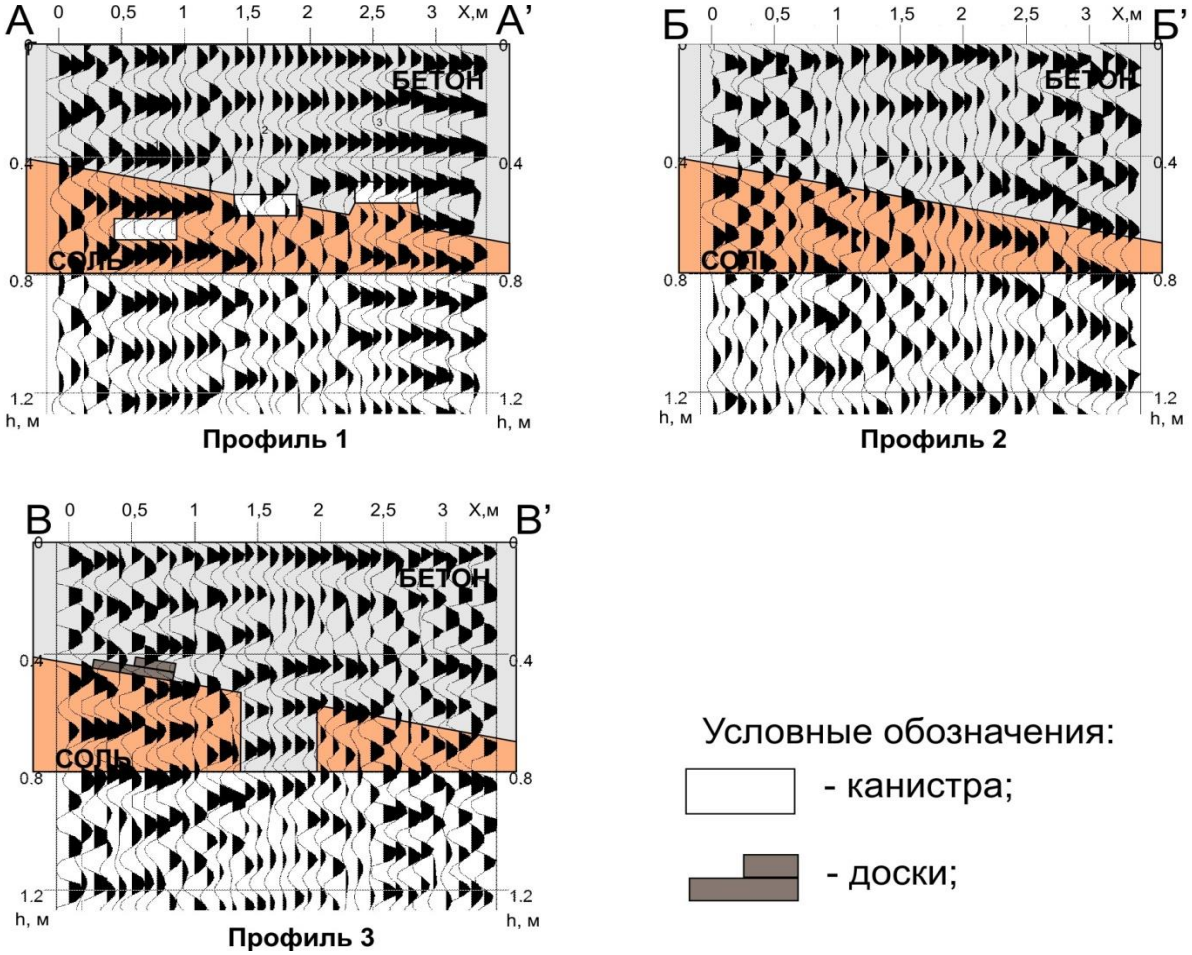


Рис. 2.16 – Глубинные разрезы по профилям, станция ТЕЛСС-3

Неоднородности, заложенные в модель – полости, древесина, бетонный столбик – никак не проявились в разрезах.

Аналогичные результаты получены с использованием аппаратуры IS-48, в соответствии с рис. 2.17. Основное отличие результатов IS-48 от ТЕЛСС-3 – более высокочастотный состав записи со станции ТЕЛСС-3, что вызвано влиянием низкочастотного фильтра указанной станции, в то время как станция IS-48 регистрировала запись на открытом канале.

Основными причинами отсутствия положительных результатов авторы считают слишком низкий частотный состав сигнала и недостаточный частотный диапазон регистрирующей аппаратуры. Причем в данном случае, недостаточный частотный диапазон обусловлен как слишком низкой частотой

дискретизации (4 и 30 кГц), так и характеристиками сейсмоприемников GS-20DX, верхний предел пропускания которых оценивается производителем в 160 Гц.

Таким образом, для получения удовлетворительного качества сейсмического материала, необходимо: значительно повысить частоту дискретизации, использовать более высокочастотные сейсмоприемники, использовать более высокочастотный источник колебаний, что, фактически, означает необходимость перехода к акустической аппаратуре.

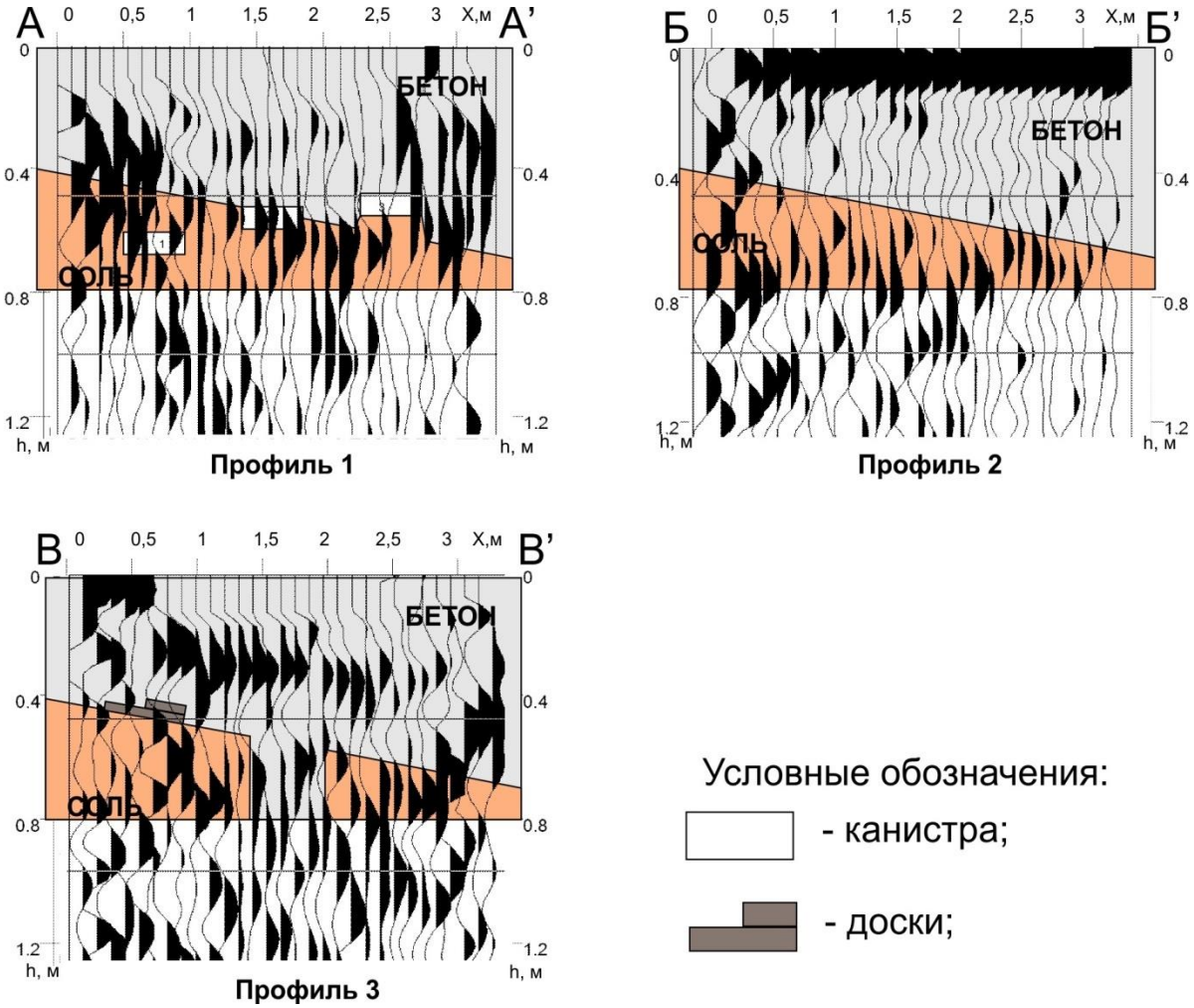


Рис. 2.17 – Глубинные разрезы по профилям, станция IS-48

2.2.3. Акустические исследования

Работы акустическим локатором Эхо-3М выполнялись для оценки возможности подробного изучения строения закрепного пространства с помощью одноканального зондирования и с помощью методик, аналогичных применяемым в сейсморазведке, в том числе с помощью методики ОГТ. Ожидаемые результаты: получение отражения от границы соль-бетон, изучение подробных скоростных и плотностных характеристик бетона, обнаружение трещиноватых зон в бетоне и полостей в закрепном пространстве.

Методика полевых работ прибором Эхо-3М

Работы выполнены с помощью акустического локатора Эхо-3М. Технические характеристики прибора позволяют работать с частотой дискретизации до 50 кГц, что гарантирует максимальную частоту записи порядка 12 кГц. Большим преимущество аппаратуры является наличие источника колебаний, согласованного по своим амплитудно-частотным характеристикам с регистрирующим каналом. Параметры регистрации – длина записи 80 мс, частота сигнала – 20 кГц, верхняя частота среза – 12 кГц, число периодов сигнала – 1, накоплений -5. Для улучшения контакта приемника и источника колебаний с бетоном использовалась специальная контактная паста.

Первый вид работ - одноканальное профилирование, когда на каждом пикете устанавливался и источник, и приемник, на расстоянии 20 см друг от друга. Расстояние между пикетами (шаг перемещения) так же составило 20 см. Всего по данной методике отработано три профиля, на каждом по 17 пикетов, в соответствии с рисунком 2.18.

Второй вид работ с данным оборудованием – зондирование с целью получить акустограммы общего пункта возбуждения (ОПВ). В этом случае источник оставался на одном месте, а приемник передвигался с пикета на пикет, в соответствии с рисунком 2.19. Шаг пунктов приема составил так же 20 см, количество пунктов приема – 17, количество зондирований (акустограмм ОПВ) – 2.

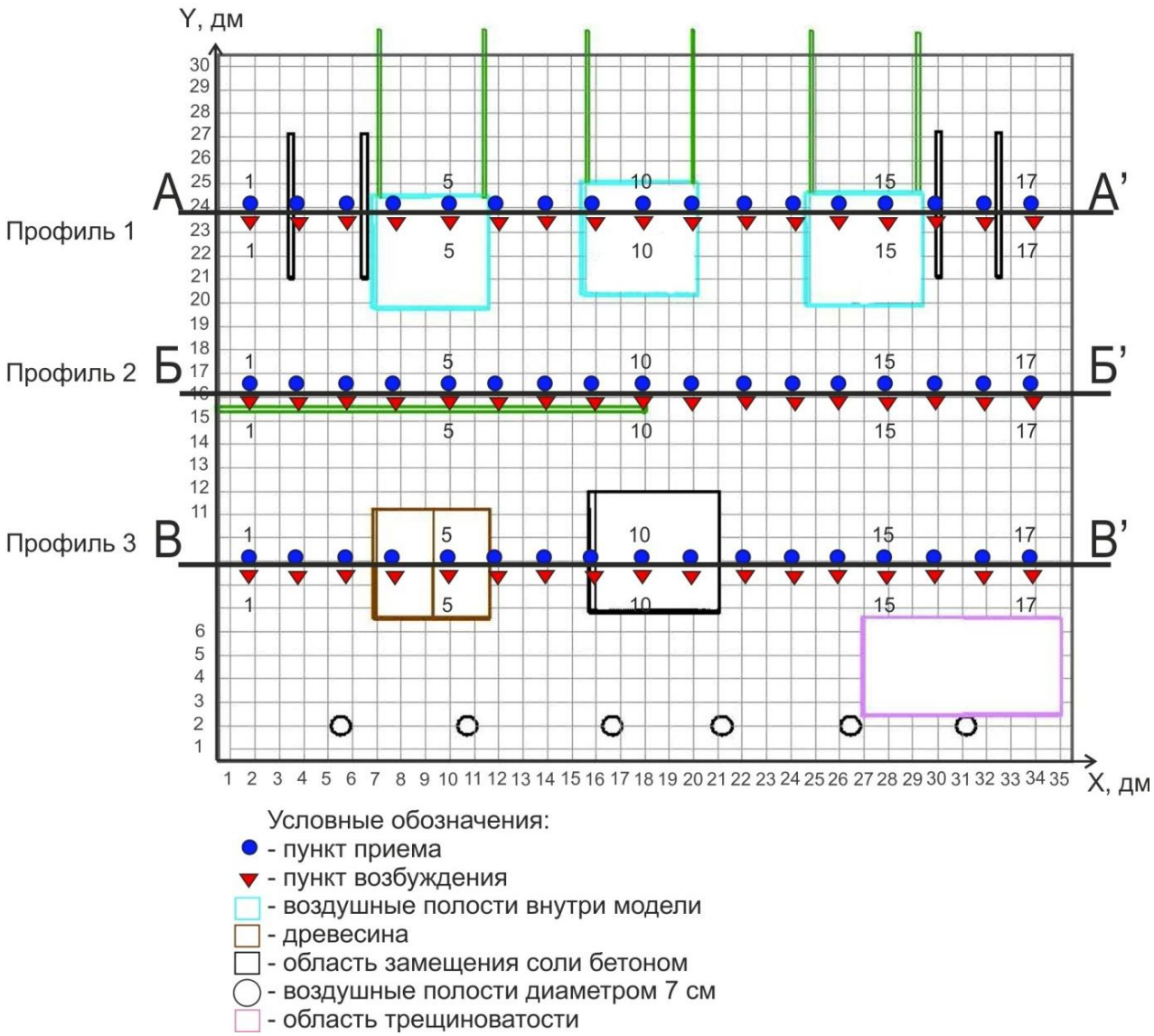


Рис. 2.18. Схема работ с аппаратурой Эхо-3М методом однократного профилирования

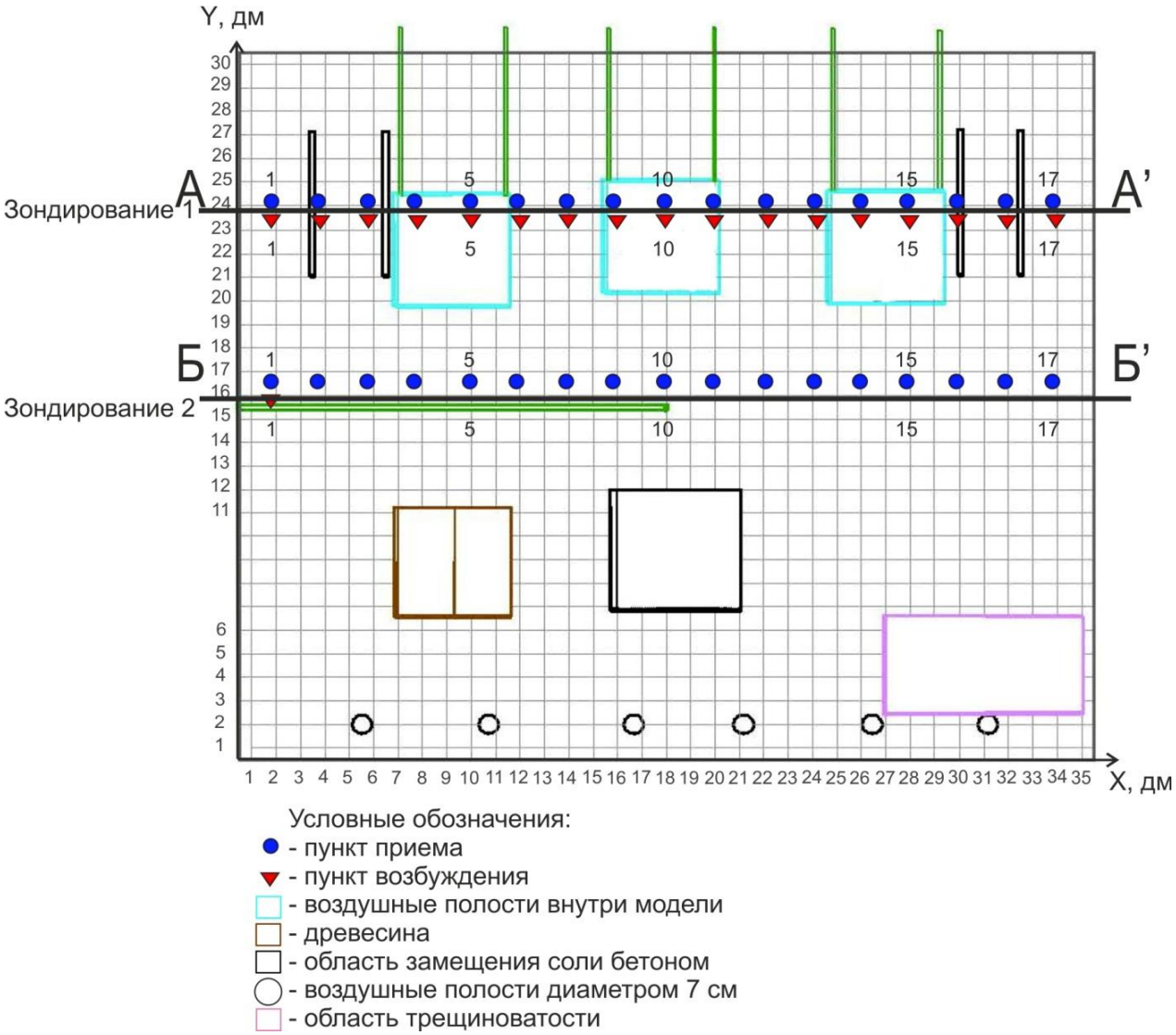


Рис. 2.19. Схема работ с аппаратурой Эхо-3М методом зондирования

Методика обработки данных аппаратуры Эхо-3М

Полученные данные подверглись следующей последовательности обработки:

- перевод из формата аппаратуры в формат персонального компьютера:
- нормировка амплитуд;
- полосовая фильтрация.

Результаты акустических исследований с аппаратурой Эхо-3М

В результате анализа данных *профилирования* выяснилось, что практически никакой полезной информации, на записях профилирования выделить не удается (рис. 2.20). Более того, на записях не удалось обнаружить даже первые вступления волн прямых волн. Возможная причина – особенности аппаратуры, которые приводят к подавлению начальной части записи. К такому выводу можно прийти, проанализировав записи зондирования, в соответствии с рисунком 3.21, на которых есть области наличия и отсутствия первых вступлений. Первые вступления отсутствуют как раз в начальной части записи, и хорошо различимы, начиная со времени примерно 0.4 мс. В наших условиях можно утверждать, что данное оборудование позволяет изучать массив только с глубины 1,5 метра и далее. Таким образом акустические методы имеют предпосылки для решения поставленных задач, однако технические особенности, заключающиеся в подавлении начальной части записи данного прибора и отсутствие серийно выпускаемого современного оборудования, не позволяет оценить практическую применимость метода.

Анализ акустограмм указывает на возможность оценить по ним скорость распространения упругих колебаний, и косвенным образом – плотность.

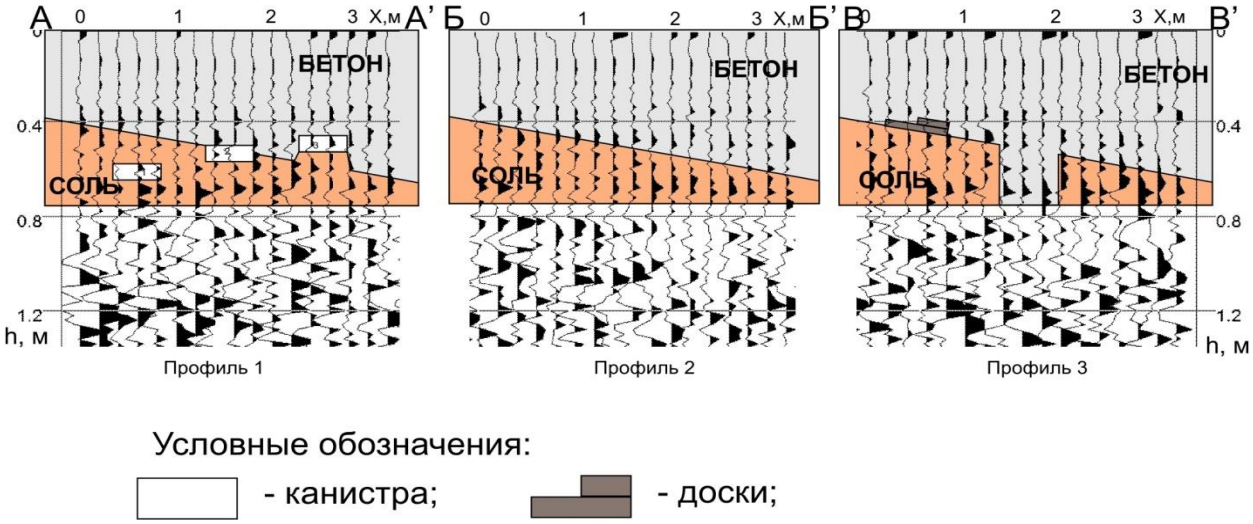


Рис. 2.20. Результаты профилирования с прибором Эхо-3М – акустические разрезы

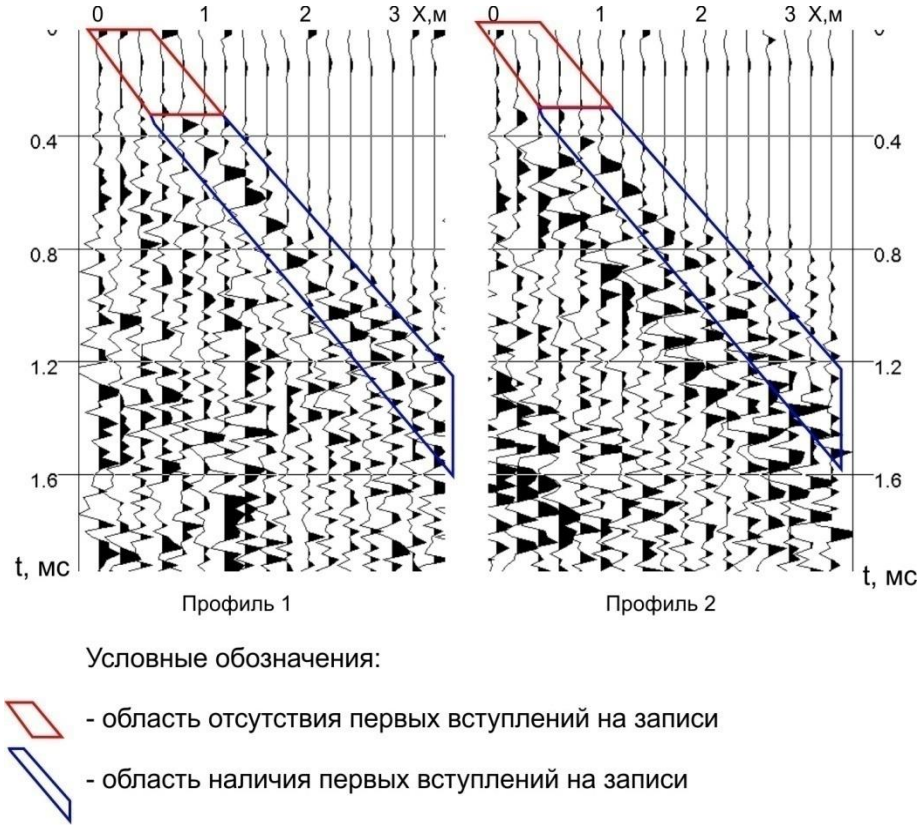


Рис. 2.21. Результаты зондирования с прибором Эхо-3М – акустограммы

2.2.4. Ультразвуковая томография

Работы проведены акустическим томографом A1040MIRA, производства фирмы ООО «Акустические контрольные системы». Основной шаг проведения работ по профилю 10 см, шаг между профилями 10 см (параметры рекомендованные производителем). Средняя скорость поперечных волн в бетоне составила 2550 м/с. Работы проведены на четырех частотах 25, 40, 60, 85 кГц. При этом 25 и 85 кГц – соответственно нижняя и верхняя границы рабочих частот прибора. Работы проведены в режиме «карта», позволяющем строить объемные изображения объекта исследования. Пример получаемого куба данных представлен на рис. 2.22.

В связи с тем, что результатом работ методом ультразвуковой томографии является объемное изображение, для сравнения результатов

выбраны несколько, наиболее контрастных и информативных разрезов, схема их расположения в пространстве модели дана на рис. 2.23.

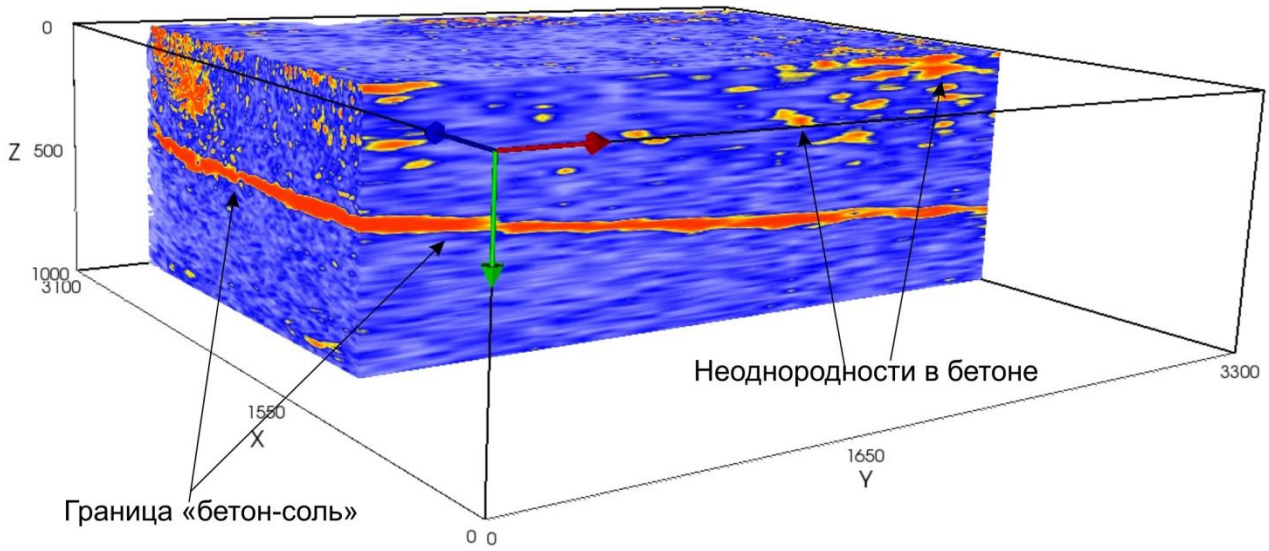


Рис. 2.22. Результаты томографии на частоте 60 кГц

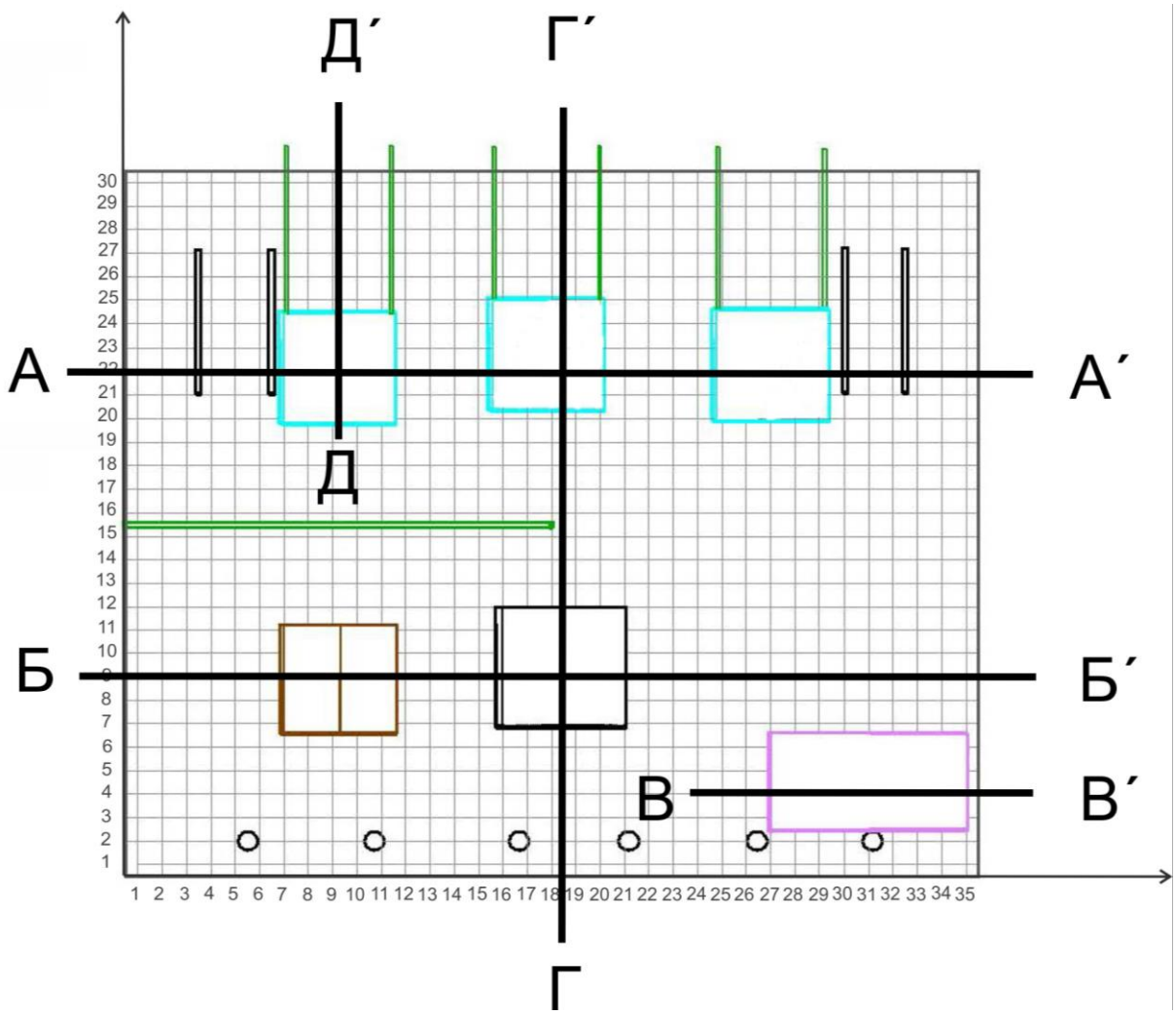


Рис. 2.23. Схема линий разрезов использованных для анализа

Сравнение результатов работ на разных частотах показано на рисунках 2.24–2.25. В результате анализа данных установлено, что образ донной поверхности (отражение от границы бетон-соль) при частоте 85 кГц виден только на глубине до 400–450 мм. Вероятно при работе на данной частоте значительное влияние на результат оказывает крупность фракции заполнителя (гравий 20–40 мм), а так же возможное наличие «непроливов» бетона и скоплений заполнителя, так как заливка бетона происходила без вибрации. Эти причины могут приводить к значительному рассеиванию энергии зондирующего импульса.

При работе на частотах 25–60 кГц, результат гораздо более информативный. Большая по сравнению с предыдущим этапом измерений длина волны позволяет сигналу от источника огибать мелкие препятствия (заполнитель), а не рассеиваться из-за многочисленных переотражений. За счет этого упругими колебаниями достигается граница бетон-соль. Опытным путем установлено, что в соль сигнал не распространяется. Причиной этого может быть наличие воздуха на контакте двух исследуемых сред.

При использовании частот 25, 40, 60 кГц в целом получены похожие результаты, и отражение от границы бетон соль прослеживается четко на всех исследуемых глубинах. Погрешность определения мощности бетона не превышает 5-10 % в зависимости от используемой частоты. Различия заключаются только в детальности получаемых результатов. Чем выше частота, тем более точно можно определять параметры границы (размеры) неоднородностей. Например, при частоте 25 кГц, образ куба бетона (рис. 2.26) различим только по второму донному сигналу, горизонтальный размер неоднородности, который можно определить по этому сигналу составляет 580 мм. При частоте 40 кГц размер неоднородности – 510 мм. При частоте 60 кГц размер неоднородности – 480 мм. Реальный размер 470–480 мм.

Несмотря на большую детальность получаемых результатов, такая точность зачастую является избыточной. А высокая частота (60 и 85 кГц) может приводить к появлению ложных аномалий (рис. 2.27). Для

подтверждения этой гипотезы сравним две аномальные области: первая является следствием отражения сигнала от полиэтиленовой пленки, заложенной в модель (разрез по линии В-В′, см. выше рис. 2.23), а вторая вызвана скоплением заполнителя и неровностями на поверхности изучаемого объекта (разрез по линии Д-Д′, см. выше рис. 2.23). Из левой части рисунка видно, что трещина в бетоне прослеживается на всех частотах, при этом наиболее четко при минимальной частоте 25 кГц. В правой части рисунка показан разрез по линии Д-Д′, отдельно отметим то, что в этой части модели, в бетоне, никаких объектов нет. Аномальная область уверено прослеживаемая в диапазоне частот 60-85 кГц, является следствием скопления заполнителя (гравий 20–40 мм).

Заполнение канистр водой и рассолом никак не повлияло на результаты зондирования. Этот факт доказывает ранее высказанное предположение о том, что сигнал не распространяется ниже границы бетона.

По результатам ультразвуковых исследований можно сделать следующие основные выводы:

- акустический сигнал не распространяется ниже границы бетона;
- наличие воды/рассола в закрепном пространстве не отражается на результатах зондирования;
- при увеличении частоты зондирования повышается точность определения размера объектов, однако, слишком высокие частоты приводят к отображению на результатах контроля скоплений заполнителя (галька, гравий), которые могут быть приняты за дефекты бетона;
- оптимальной частотой является 40 кГц;

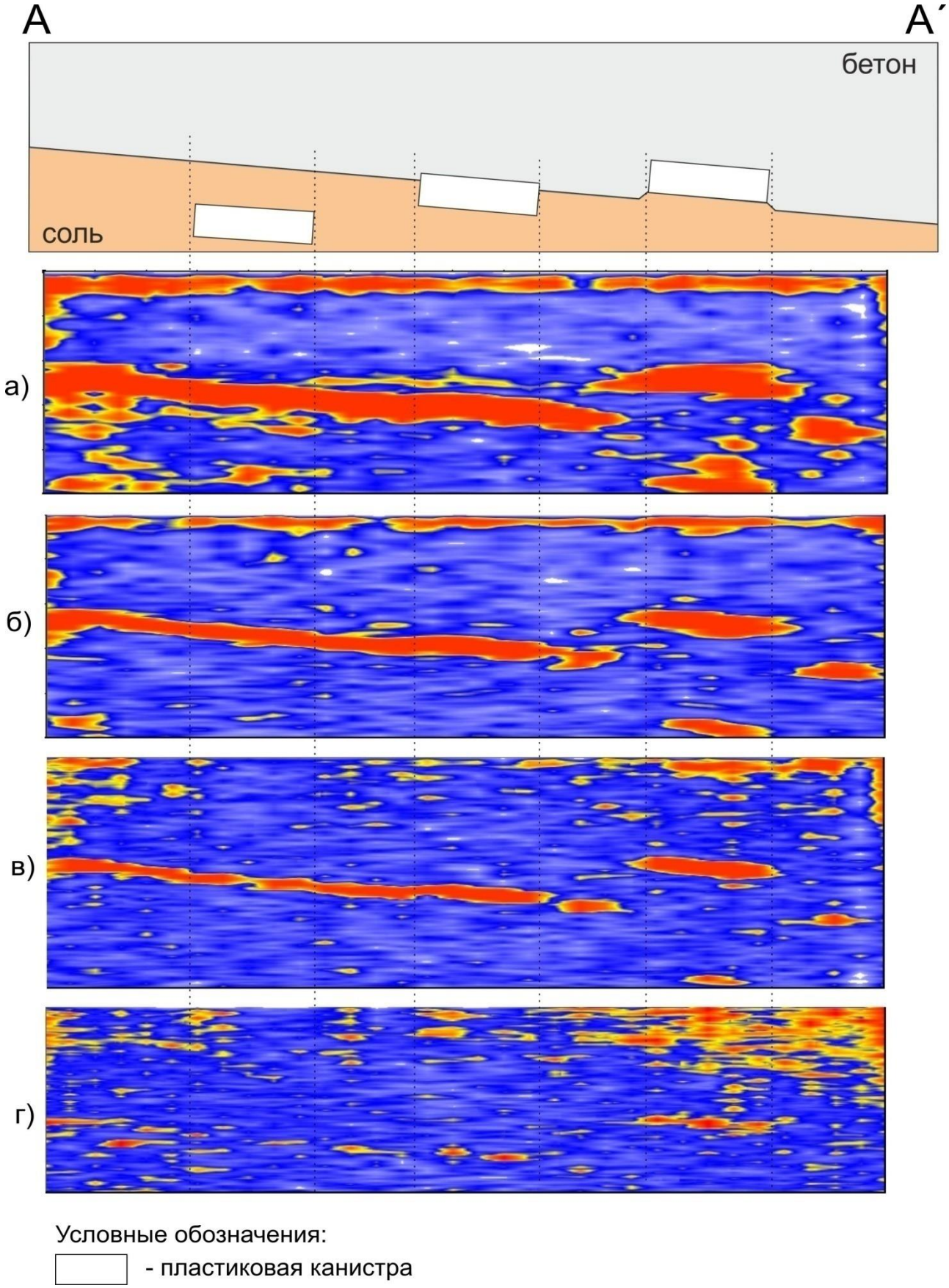


Рис. 2.24. Сравнение результатов ультразвуковой томографии через линию А-А′ при разных рабочих частотах: а) 25кГц, б) 40кГц, в) 60 кГц, г) 85 кГц

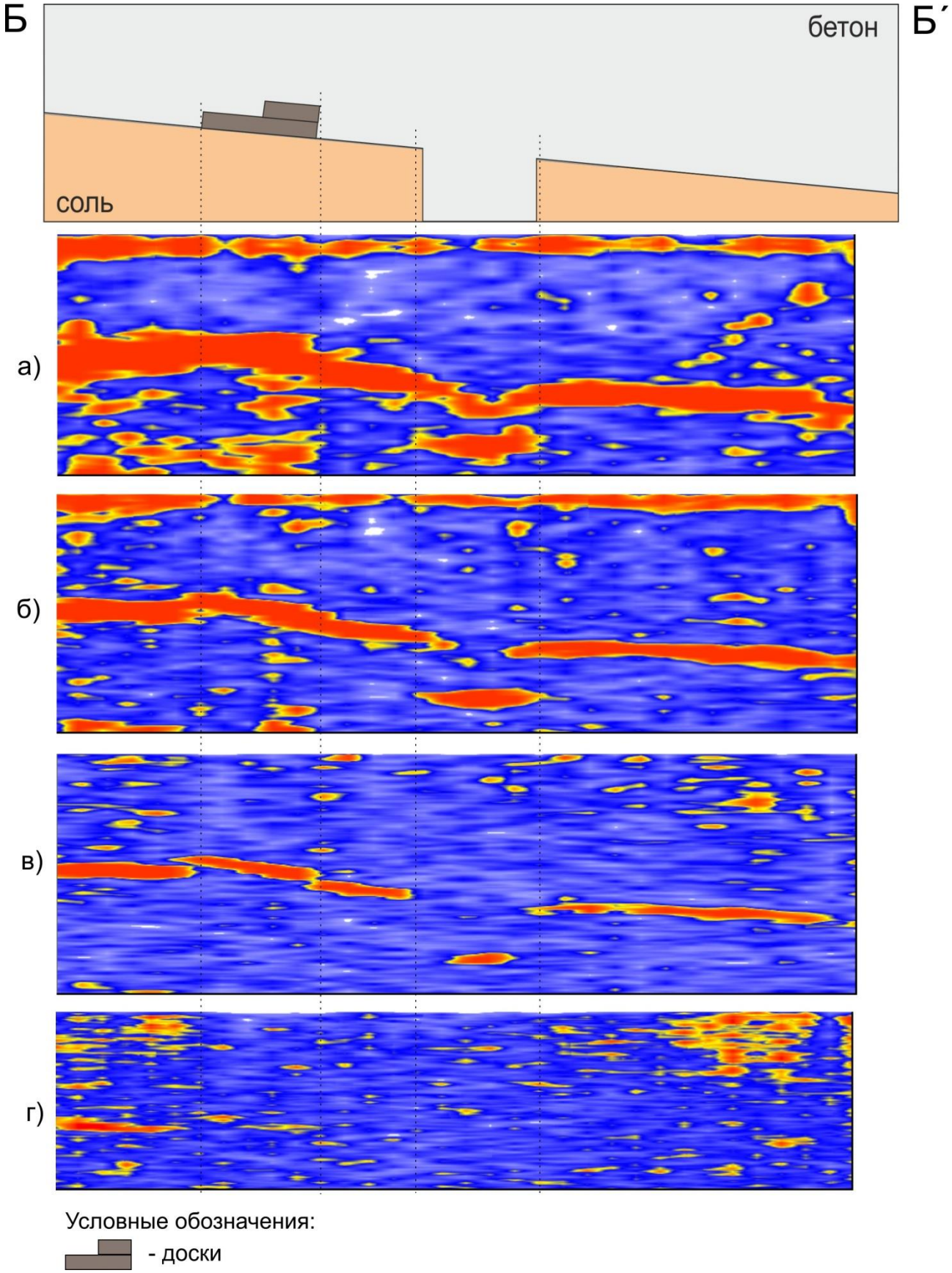


Рис. 2.25. Сравнение результатов ультразвуковой томографии через линию Б-Б′ при разных рабочих частотах: а) 25кГц, б) 40кГц, в) 60 кГц, г) 85 кГц

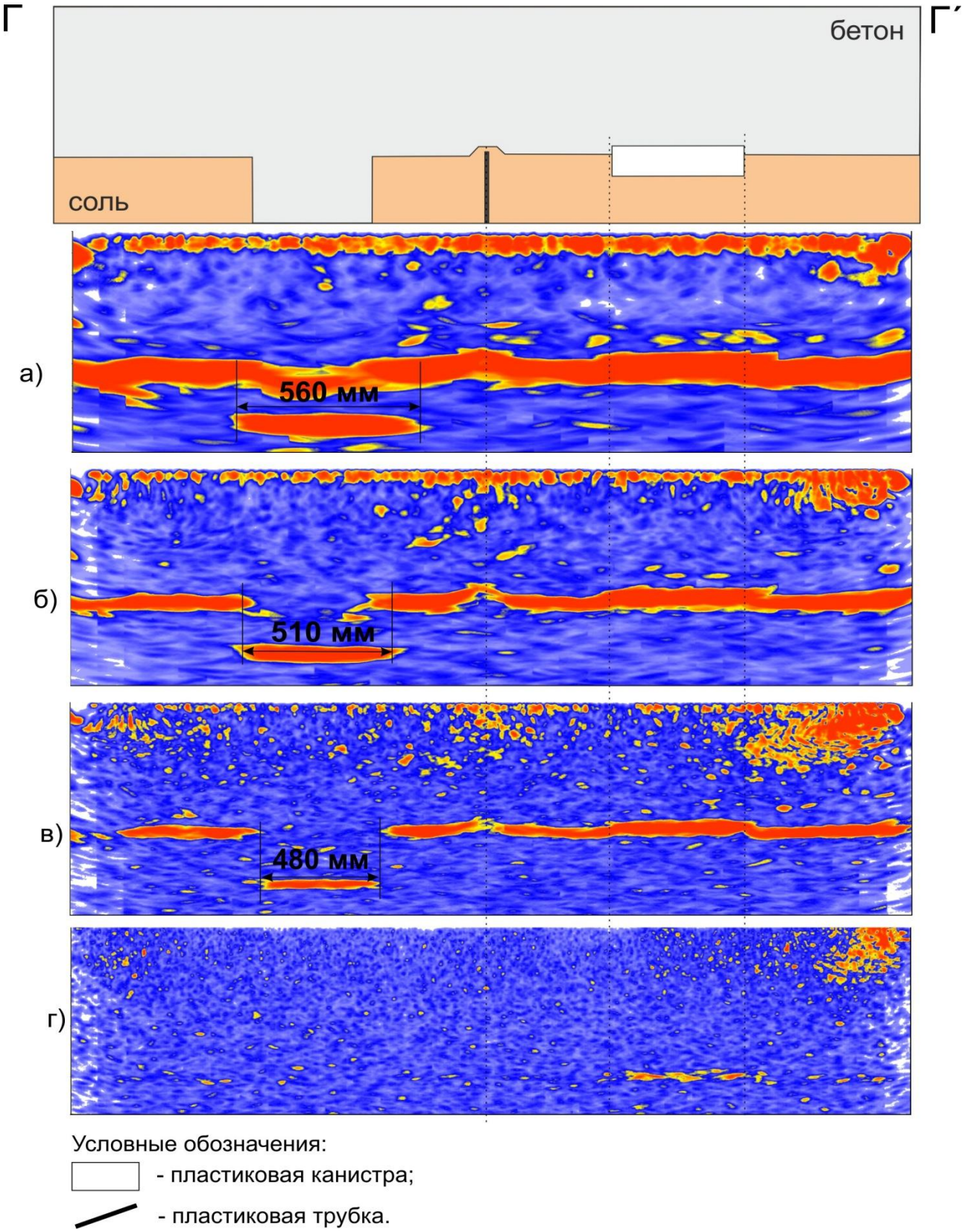
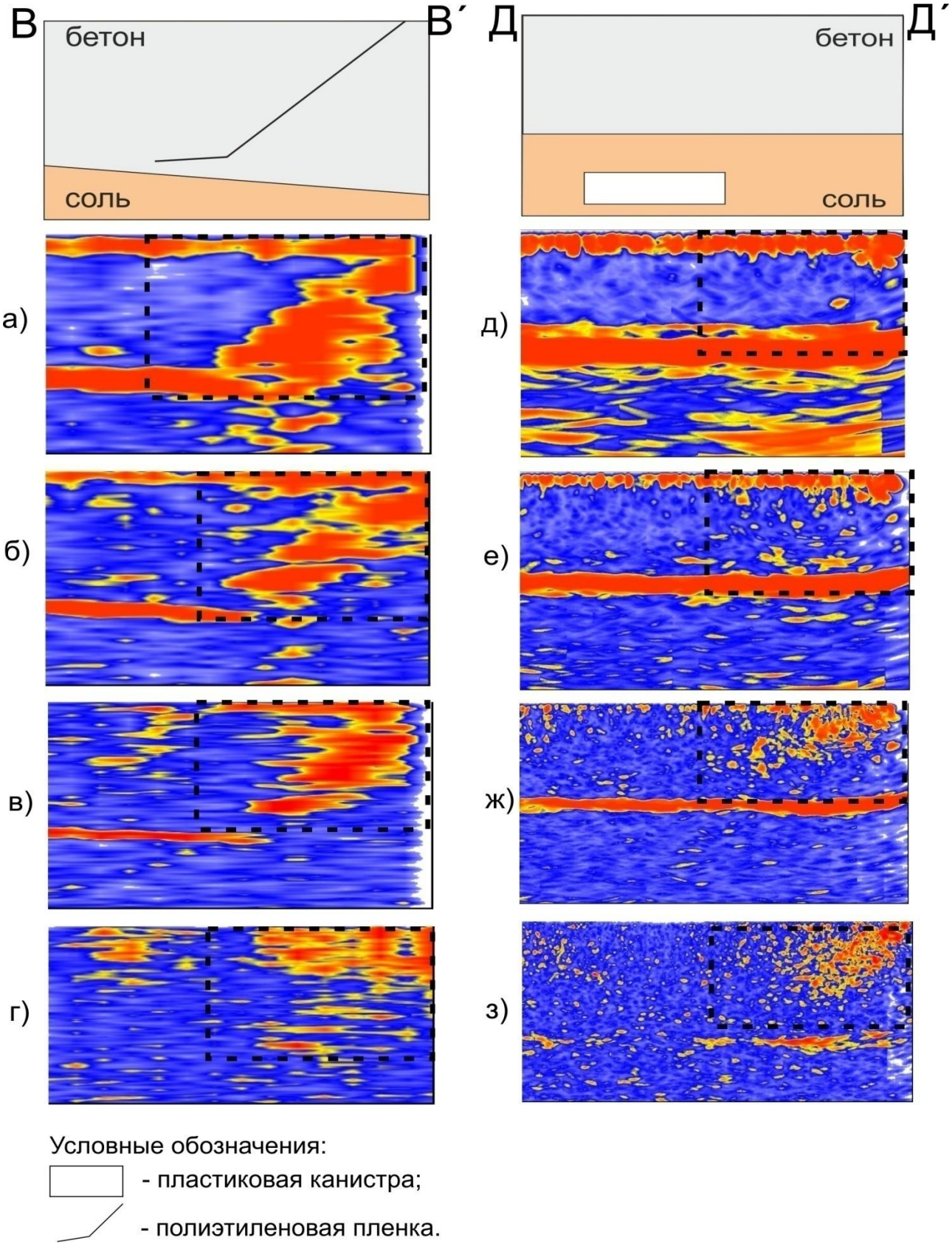


Рис. 2.26. Сравнение результатов ультразвуковой томографии через линию Г-Г′ при разных частотах: а) 25кГц, б) 40кГц, в) 60 кГц, г) 85 кГц



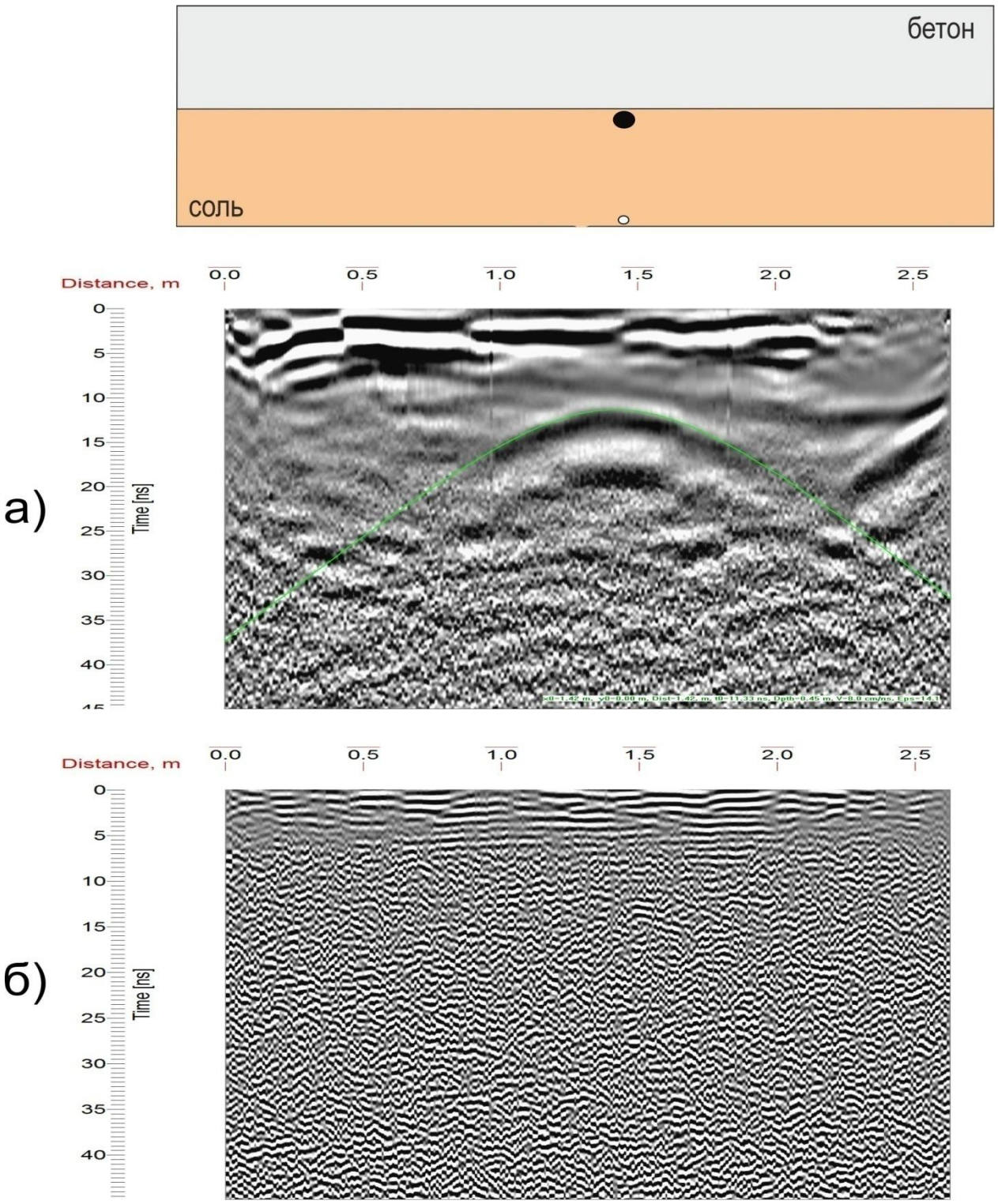
Рисс 2.27. Пример возникновения ложных аномалий. Аномалия от полиэтиленовой пленки (трещины) в бетоне при разных частотах: а) 25кГц, б) 40кГц, в) 60кГц, г)85кГц). Ложная аномалия при разных частотах: д) 25кГц, е) 40кГц, ж) 60кГц, з)85кГц)

2.2.5. Георадиолокация

Работы выполнены георадаром SIR-3000 (компания GSSI, США) на постоянной базе источник-приемник, с применением экранированных антенных блоков 400 и 900 МГц. Обработка данных параллельно выполнена в двух программных комплексах: RadExplorer 1.42 и RADAN 7.

Работы проведены по сети профилей аналогичной ультразвуковой съемки. Шаг по профилю для антенны 400 МГц составлял 1 см, для антенны 900 МГц 0,5 см. Измерение расстояния производилось при помощи одометров (колесо) входящих в комплект поставки антенн.

Известно, что определение глубины отражающих границ в георадиолокации, как и в любом волновом методе выполняется с учетом скорости распространения изучаемых волн в среде. Скорость электромагнитных волн в бетоне 9–15 см/нс [6], что означает разницу при определении глубины до 40%. С целью определения реальной скорости в исследуемой среде, на границу бетон-соль была помещена металлическая труба, диаметром 2 см. Съемка выполнена по профилю перпендикулярному трубке. На данном участке мощность бетона составляла 45 см. Обработанные радарограммы по профилю представлены на рисунке 2.28. На радарограмме антенного блока 400 МГц четко видна ось синфазности дифрагированной волны от трубки. Скорость определена путем наложения на ось синфазности теоретической гиперболы, максимально подходящей по параметрам. Таким образом, путем сравнения (компарационный метод измерений) определена скорость распространения волн в интервале от поверхности модели до трубки. Скорость распространения волн составила 8,0 см/нс. Указанная скорость ниже табличной [6]. С целью проверки решим обратную задачу, по определению глубины объекта при известной скорости. Известно, что $h = v \cdot t/2$, где h - глубина, v - скорость , t – двойное время. $h=8{,}0 \cdot 11{,}33/2 = 45{,}3$ см. Истинная глубина трубки от поверхности около 45 см.



Условные обозначения:

● - металлическая трубка;

○ - пластиковая трубка.

Рис. 2.28. Георадиолокационный профиль над металлической трубой: а) антенна 400 МГц, б) антенна 900 МГц

Отдельно рассмотрим результат, полученный с частотой 900 МГц. Граф обработки идентичен обработке для частоты 400 МГц, и состоял из следующих процедур:

- удаление постоянной составляющей;
- смещение нуля времени;
- полосовая фильтрация;
- удаление звона антенны;
- амплитудная коррекция.

Обработка данных в программе RADAN 7, имеющей несколько отличающийся граф обработки, а так же применение таких возможностей оборудования как stacking (накопление), и автоматической регулировки усилений результатов не дало. После этого было принято решение покрыть модель сетью профилей с шагом 20 см. Совместная обработка куба данных в программе RADAN, а так же обработка профилей по отдельности результатов не дали. В совокупности с информацией о низких значениях скорости в бетоне можно предположить, что при заливке бетона произошло растворение некоторого количества соли на контакте двух сред, в результате чего бетон вместе с водой впитал в себя некоторое количество соли, что привело к увеличению его диэлектрической проницаемости и уменьшению сопротивления. В георадиолокации уменьшение сопротивления среды снижает не только скорость распространения электромагнитных волн, но и усиливает поглощающие свойства этой среды. Таким образом, можно утверждать, что применение антенных блоков с частотой 900 МГц и выше **не целесообразно.** Применение антенн с частотой ниже 400 МГц не имеет смысла, так как их применение в стволе невозможно виду значительных размеров и веса аппаратуры (вес антенного блока 200 МГц составляет 18,5 кг).

Учитывая вышеизложенное, дальнейшие работы проведены только с применением антенного блока с центральной частотой 400 МГц.

Работы проведены как в площадном, так и в профильном вариантах. В площадном модель была покрыта продольными и поперечными профилями с

шагом 30 см, для построения трехмерного изображения изучаемой среды в программе RADAN. Результаты обработки показаны на рисунке 2.29. В целом результат достаточно информативный и местоположения крупных дефектов (например канистра расположенная в бетоне) фиксируются достаточно уверенно. Граница бетон-соль так же прослеживается на всем её протяжении. Нижняя граница модели (дневная поверхность) не видна, это может быть связано со значительным затуханием электромагнитных волн в солях. Главным негативными фактором явился тот, что в программе нет возможности обрабатывать каждую радарограмму по отдельности, в результате чего для всего набора данных применяются процедуры с абсолютно одинаковыми параметрами. То есть процедуры требующие от пользователя задания временного интервала (смещение нуля времени, усиления и т.д.) могут работать не совсем корректно.

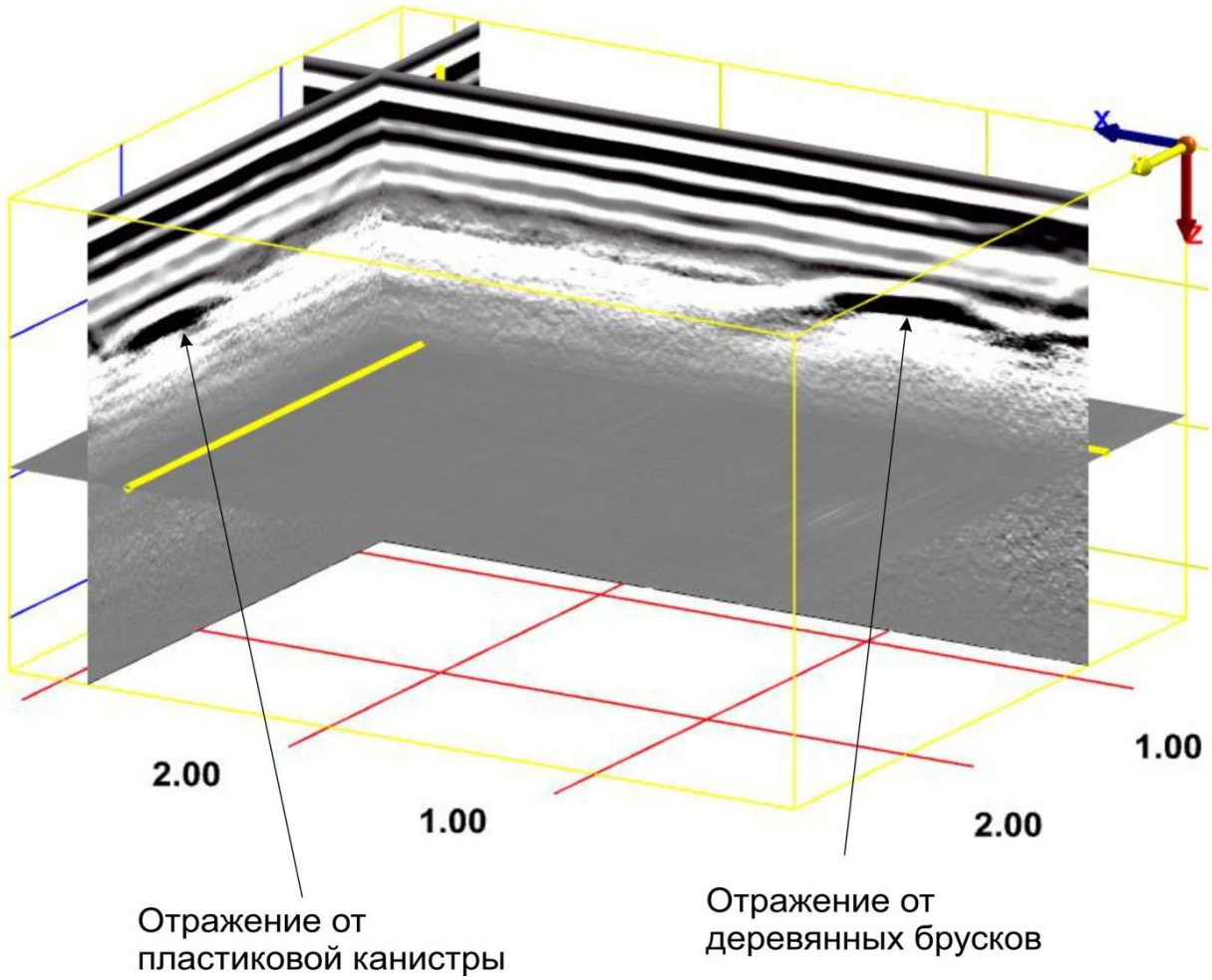


Рис. 2.29. Результаты трехмерной обработки георадиолокации

Для детального изучения работы выполнены по сети профилей, пересекающих как аномальные области, так и области с нормальными условиями (рис. 2.30).

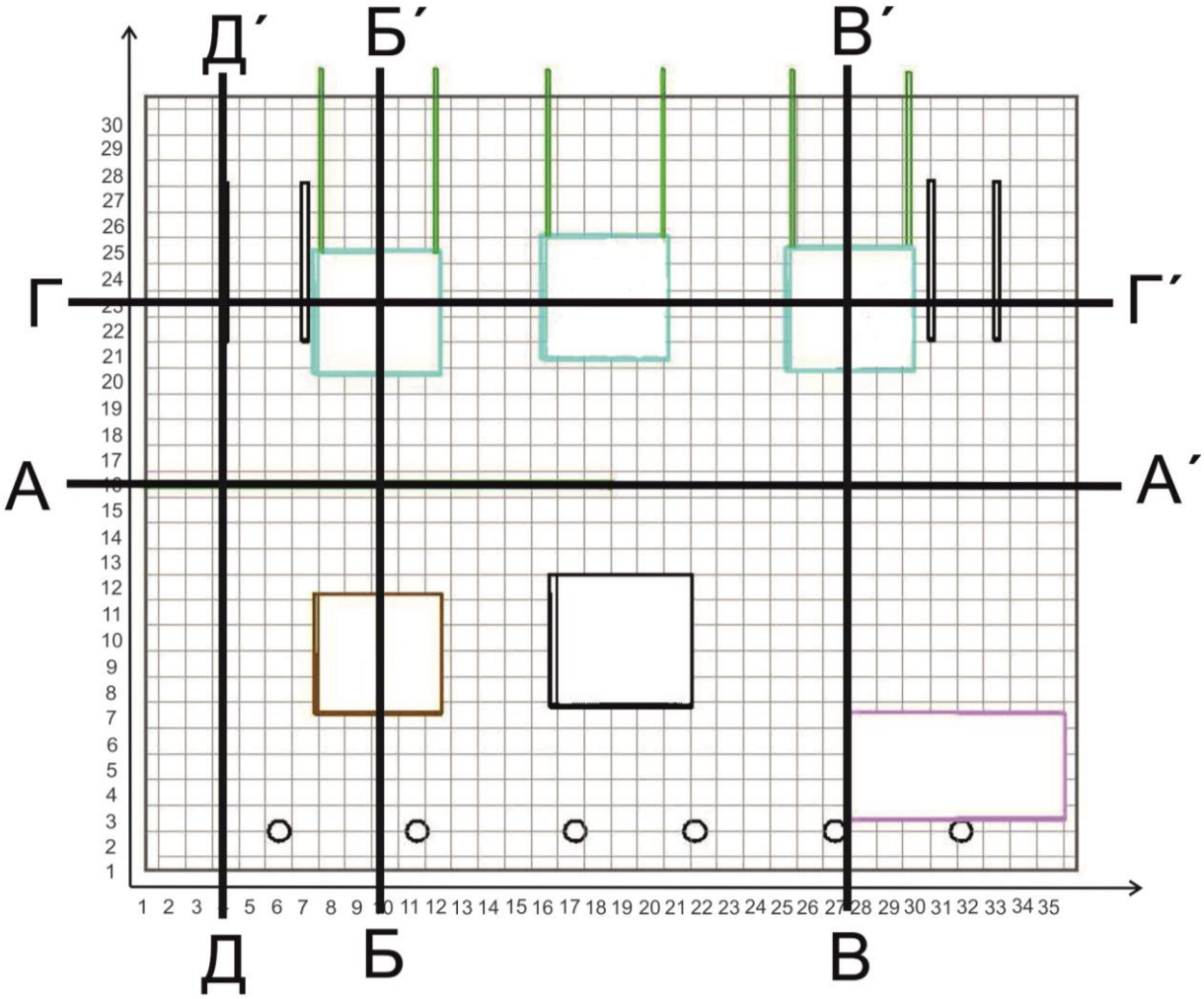


Рис. 2.30. Схема профилей георадиолокации

Разрез по линии А-А′, представленный на рисунке 3.31, указывает на то, что принципиальная возможность применения георадиолокации для исследований бетонной крепи существует. Так на разрезе уверенно выделяется граница бетон-соль, глубина залегания границы соответствует истинной мощности бетона (при скорости 8 см/нс, установленной опытным путем). Нижняя граница модели по представленным данным неопределима. Границы, выделяемые в толще бетона, вероятнее всего связаны с участками скопления заполнителя. В правой части радарограммы наблюдается резкое поднятие

границы. Учитывая то, что угол поднятия 45^0, можно утверждать, что вероятнее всего это боковое отражение от границы модели. Кроме этого, похожее отражение, но меньшей интенсивности наблюдается и в начале профиля.

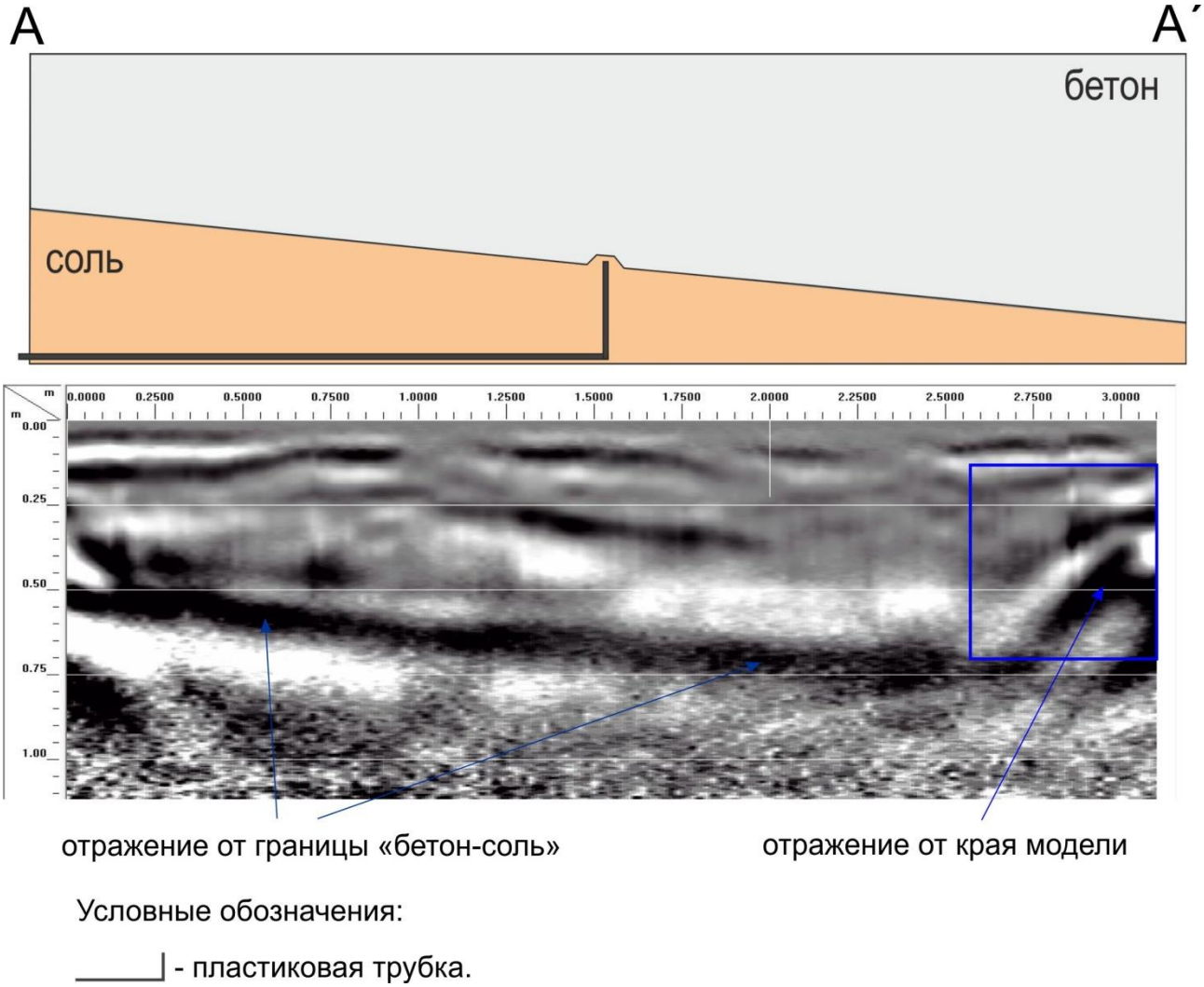


Рис. 2.31. Результаты зондирования по линии А-А′ [38]

Исследования через заложенные неоднородности начаты с профиля, проходящего через заложенные в модели теннисные мячи, однако они на результатах не отображаются.

Второй профиль проходил через деревянные бруски и канистру, расположенную в соли (профиль Б-Б′, см. выше рис. 2.30). Исследования состояли из трех этапов. На первом этапе канистра была пустая, на втором она заполнена водой, на третьем рассолом с минерализацией около 200 г/л.

Результаты обработки данных георадиолокации представлены на рисунке 2.32. Полученные в результате обработки радарограмы, повторяют контуры внутренней структуры объекта. Скорость в бетоне принята равной 8 см/нс. Граница «бетон-соль» достаточно уверенно прослеживается на большей части профиля, исключением являются краевые части, в которых появляется краевой эффект от границ модели. Деревянные бруски, расположенные на поверхности соли, дают контрастное высокоамплитудное отражение. Пластиковая канистра, погруженная в соль, на глубину около 10 см, проявляется хуже. На участке, где расположена канистра амплитуда отраженного сигнала от границы «бетон-соль» так же несколько выше, чем на остальной части профиля. Это может быть связано с неравномерным уплотнением соляного массива после нагрузки вызванной бетоном, и как следствие образованием воздушного зазора на контакте. При заполнении канистры рассолом, она начинает проявляться в виде отражения под границей бетона, что полностью соответствует действительности.

Третий профиль, выбранный для анализа данных, проходил через центр модели и пересекал канистру, расположенную в бетоне (профиль В-В′, см. выше рис. 2.30). Так же как и в случае, рассмотренном выше, исследования состояли из трех этапов. На первом этапе канистра была пустая, на втором она заполнена водой, на третьем рассолом с минерализацией около 200 г/л. В данных всех трех этапов уверенно прослеживается высокоамплитудное отражение, которое по глубине и положению на профиле, совпадает с канистрой (см. рис. 2.33). В случаях, когда канистра заполнена жидкостью, отражение становится более низкочастотным. Кроме этого происходит инверсия сигнала. Важной деталью является то, что отражения от границы бетон-соль при данных условиях не наблюдается. Это может быть связано с большой мощностью бетона в рассматриваемой части модели (до 70-75 см).

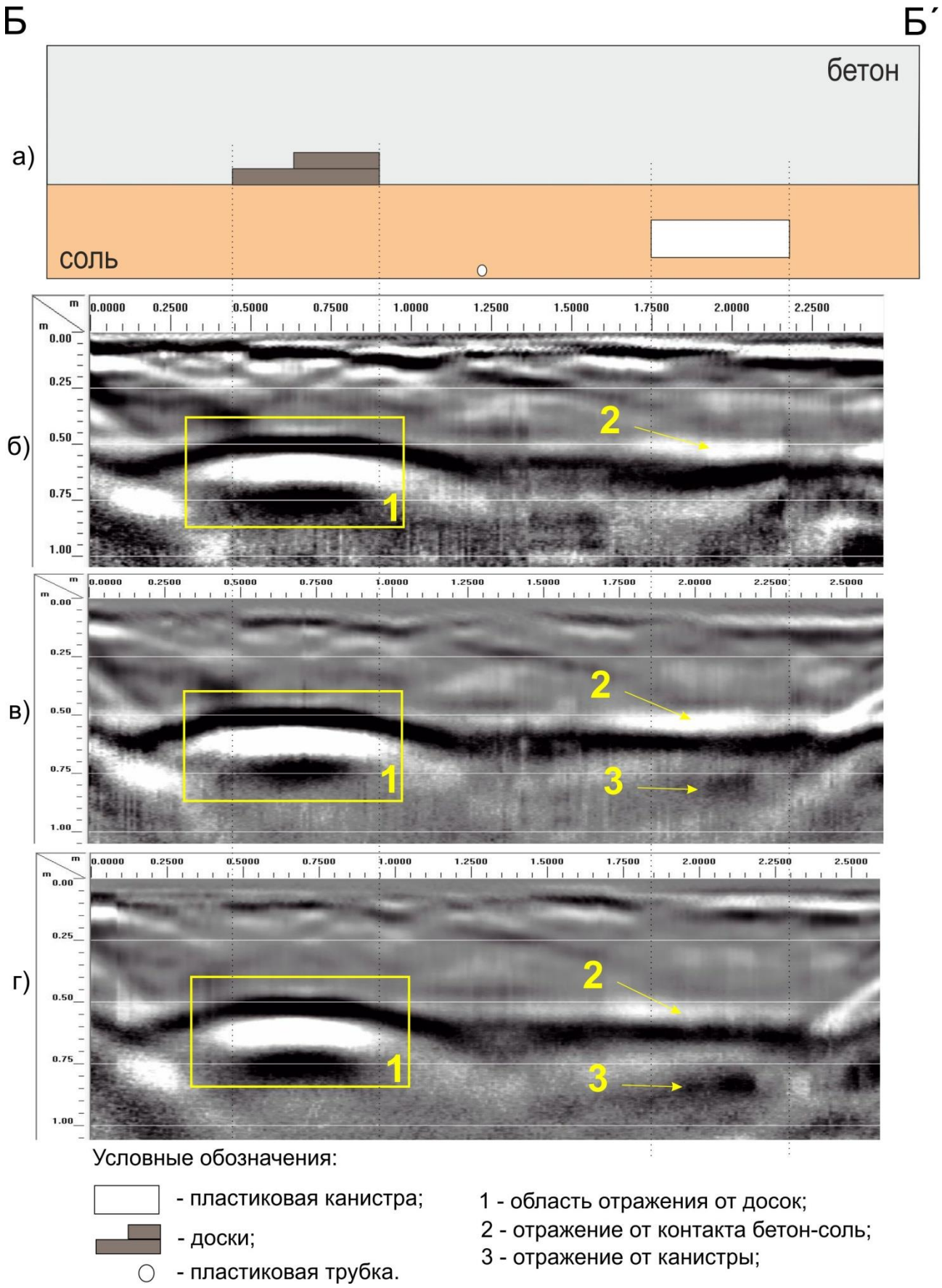


Рис.2.32. Результаты георадиолокации по линии Б-Б′: а) схема модели, б) канистра с воздухом, в) канистра с водой, г) канистра с рассолом

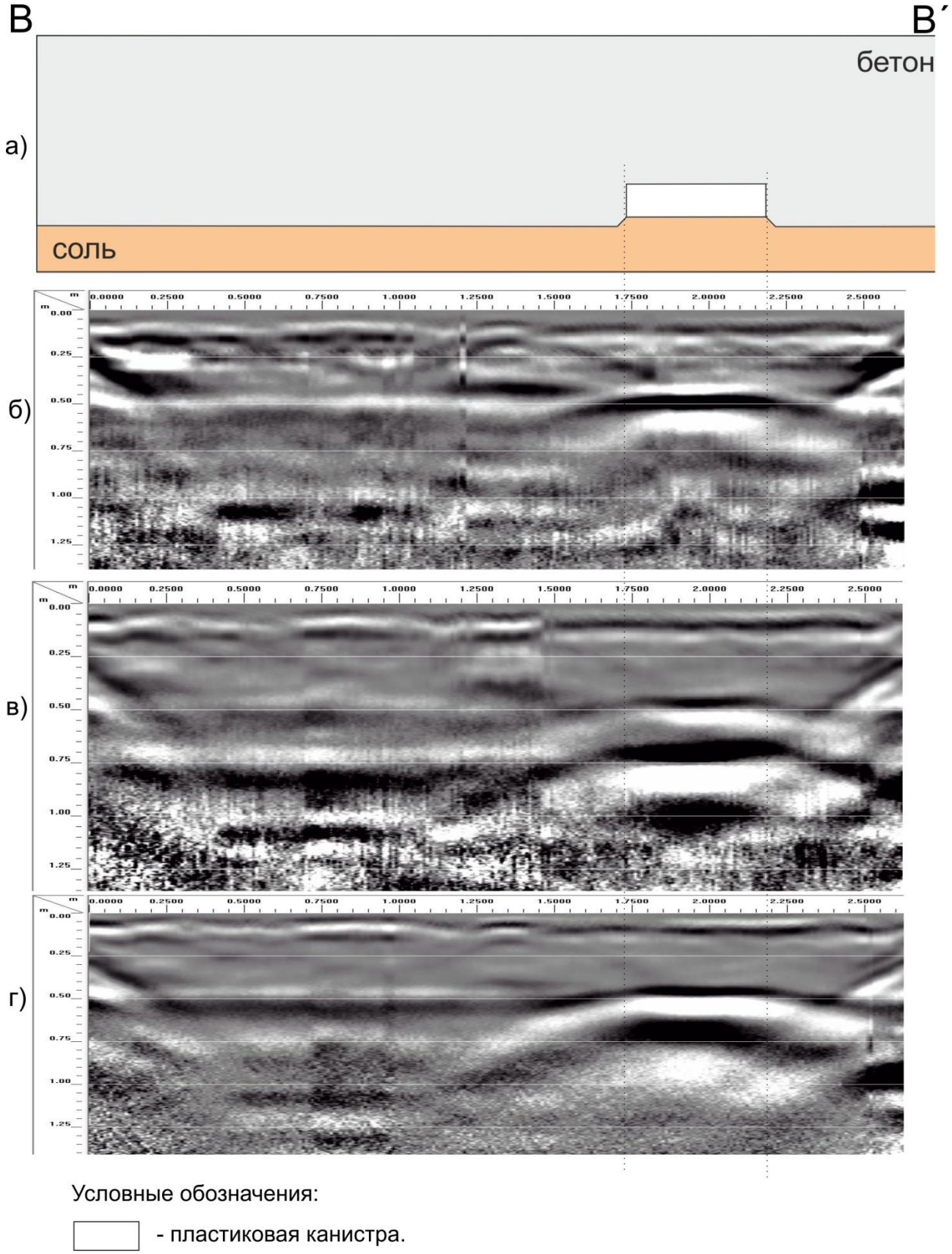


Рис. 2.33. Результаты георадиолокации по линии В-В′: а) схема модели, б) канистра с воздухом, в) канистра с водой, г) канистра с рассолом

Профиль № 4 пересекал все три канистры, помещенные в модель (профиль Г-Г′, см. выше рис. 2.30). Данный профиль моделирует все возможные варианты положения пустот. За крепью в соли, не касаясь бетона, за крепью в соли на границе с бетоном, и полость, расположенная в бетоне, но имеющая контакт с солью. Результаты георадиолокации для перечисленных случаев представлены на рисунке 2.34. Во всех трех случаях канистра, находящаяся в соли слабо проявляется на радарограммах и без знания ее местоположения выделение такой неоднородности на практике маловероятно. Канистра, расположенная на контакте бетон соль и канистра, заложенная в бетоне, уверенно выделяются в данных съемки. Границы неоднородностей наиболее четко проявляются для случая, когда канистры заполнены воздухом. Граница «бетон-соль» во всех случаях уверенно прослеживается только до центральной канистры, между канистрами 2 и 3 она угадывается только для случая, когда канистры заполнены воздухом. После заполнения канистр водой или рассолом увеличивается взаимное влияние данных неоднородностей, в результате чего определение их размеров оказывается затрудненно. Кроме того, изменение таких параметров записи, как амплитуда сигнала и частота, происходящее из-за изменений условий среды будет оказывать влияние на работу процедур обработки (АРА, удаление постоянной составляющей и др.), что приведет к общему изменению внешнего вида радарограммы. Отдельно отметим, что на всех вышерассмотренных профилях, где большая часть профиля безаномальная, неоднородности четко видны в волновых полях. В случае рассматриваемого профиля, где большое число неоднородностей, у которых размеры сопоставимы с расстоянием между ними и глубиной залегания, выделение аномалий, а так же определение размеров аномалеобразующих объектов становится затруднительным.

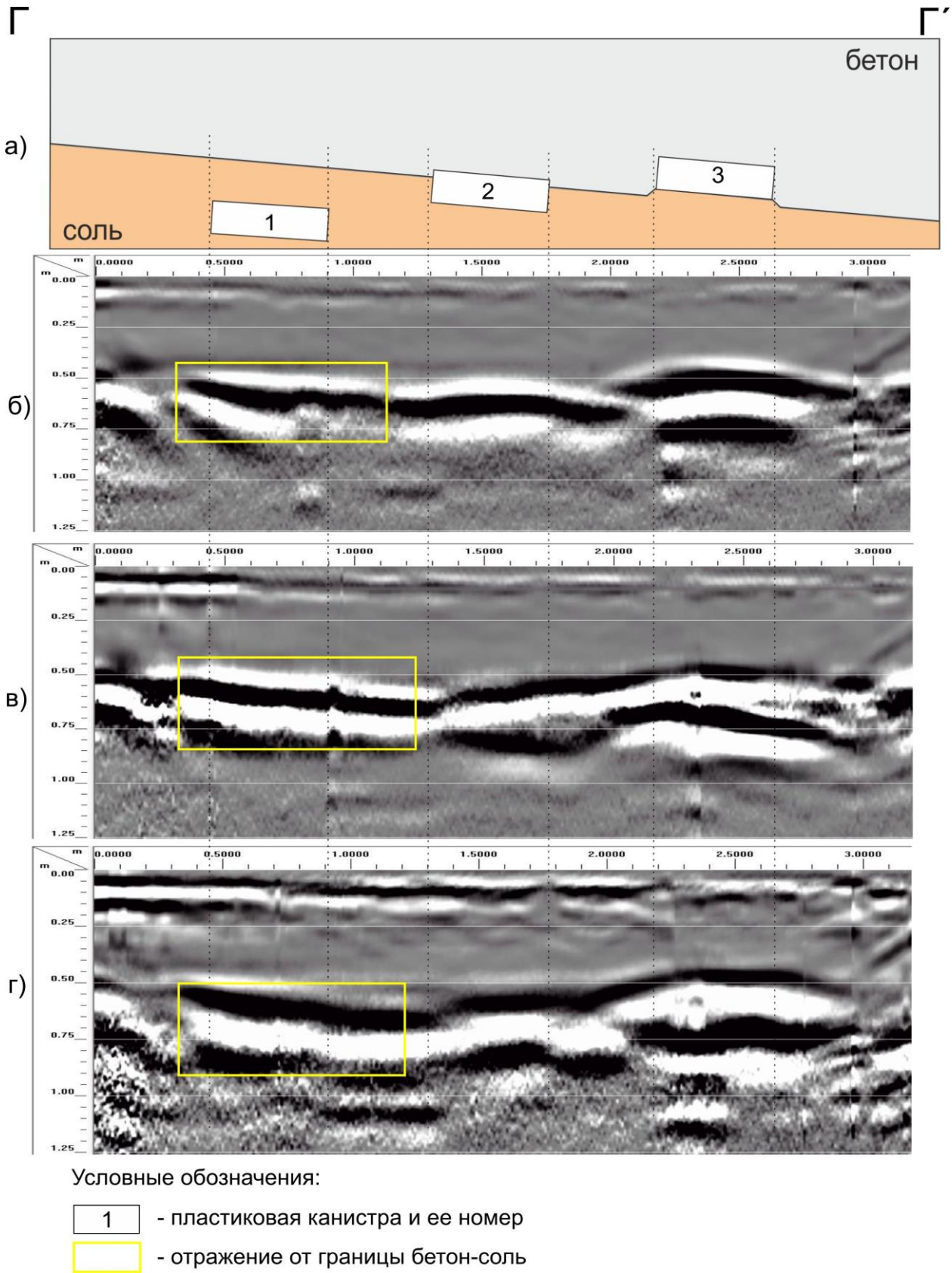


Рис. 2.34. Результаты георадиолокации по линии Г-Г′: а) схема модели, б) канистры заполнены воздухом, в) канистры заполнены водой, г) канистры заполнены рассолом

Пятый профиль (профиль Д-Д′, см. выше рис. 2.30) был выполнен для оценки влияния размеров неоднородности на форму годографа отраженной волны. Дело в том, что при создании модели, в нее были заложены неоднородности, размеры которых в 3–4 раза превышают минимальную разрешающую способность георадиолокации. С целью оценки вероятности обнаружения полостей меньших размеров была убрана часть опалубки и проведена выемка соли. Выполненные работы можно разделить на три этапа. Первый этап наблюдений выполнен до выемки соли, над монолитным неизмененным массивом. Далее была сформирована полость размерами 20х20 см, после чего она была увеличена до размеров 50х20 см.

Результаты георадиолокации над полостями показаны на рисунке 2.35. В результате обработки на радарограммах четко выделяется область дифракции в центральной части профиля, отражающая наличие полости на контакте бетон-соль. Отдельно отметим, что форма годографа (вершина годографа) растягивается с увеличением горизонтальных размеров полости. Это дает возможность оценки размеров полостей по результатам георадиолокации. Кроме этого, нужно отметить и увеличение амплитуды отраженного сигнала с увеличением размеров полости.

По результатам георадарных исследований можно сделать следующие основные выводы:

- георадиолокация позволяет решать основные поставленные задачи: выделять полости и другие неоднородности в бетонной крепи и закрепном пространстве шахтных стволов;
- для проведения работ наиболее подходящей является частота 400 МГц. Применение более высокочастотных антенн **не рекомендуется** по причине значительного затухания зондирующего импульса. Использование антенных блоков с меньшей частотой **затруднительно** из-за их габаритов;
- минимальные размеры выделяемых неоднородностей оцениваются первыми десятками сантиметров;

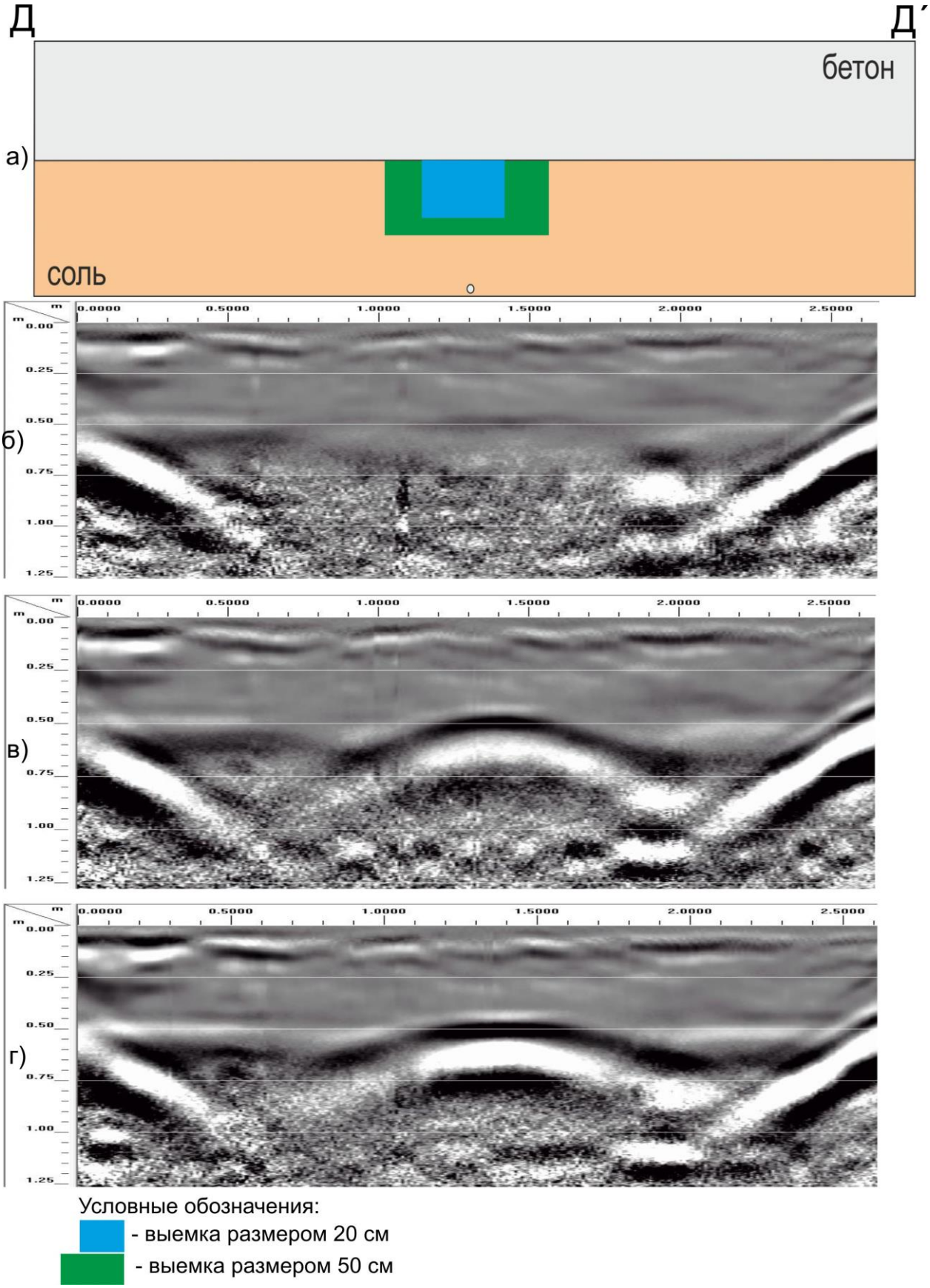


Рис. 2.35. Результаты георадиолокации по линии В-В′: а) схема модели, б) профиль над монолитным массивом, в) профиль над выемкой размером 20 см, г) профиль над выемкой размером 50

- скорость распространения электромагнитных волн в бетоне составляет 8 см/нс;
- определение границы бетона возможно до глубины порядка 900 мм;
- неоднородности на границе бетон-соль выделяются как высокоамплитудные отражения (дифрагированные волны);
- форма годографа зависит от формы полости *в плоскости разреза* – классическая форма годографа характерна для полости круглого сечения, с диаметром, близким к ¼ диаметра зоны Френеля (рис. 2.36, *а*). По мере увеличения горизонтальных размеров полости вершина годографа будет растягиваться, вплоть до крайнего случая, когда полость вытянута в плоскости разреза в форме, которую можно грубо описать прямоугольником. В этом случае на радарограммах будут наблюдаться годографы дифрагированной волны только с одним крылом, с вершиной, совпадающей с одним из верхних углов прямоугольника (рис. 2.36, *б*). Применительно к рассматриваемой ситуации при размере полости около 10–15 см будет наблюдаться классическая форма годографа, при увеличении размеров полости будет происходить увеличение горизонтальных размеров вершины годографа, что дает возможность приближенной оценки размеров полости;

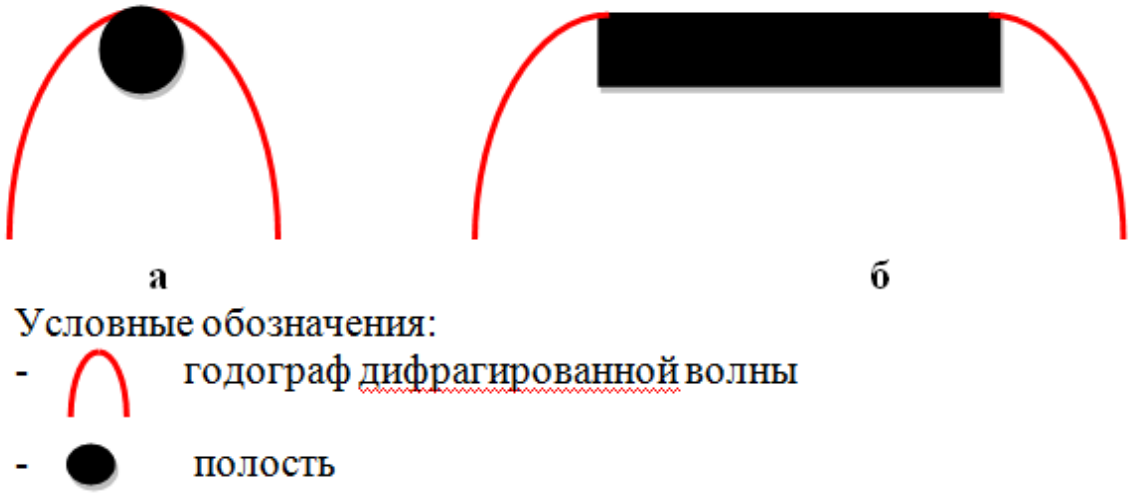


Рис. 2.36. Годограф дифрагированной волны от полости круглого сечения (*а*) и от полости прямоугольного сечения (*б*)

- амплитуда дифрагированной волны также зависит от размера полости, чем больше размер, тем выше амплитуда отраженного сигнала;
- при заполнении полости водой или рассолом происходит смена фазы (инверсия) зондирующего импульса;
- в случае большого количества неоднородностей, размеры которых сравнимы с глубиной их залегания, отмечается уменьшение горизонтальной разрешающей способности (при теоретической 15 см). Т.е. определение границ неоднородностей становится затруднительным.

2.3. Анализ результатов применения геофизических методов

Результаты геофизических исследований, проведенных на модели показывают, что методы классической сейсморазведки не позволяют решать поставленные задачи в первую очередь из-за малых размеров искомых объектов, не соизмеримых с длинами волн и частотами генерируемых сигналов. Приборы, работающие в акустическом диапазоне частот, обладают потенциальной возможностью решения поставленных задач, однако в настоящее время на российском рынке серийно не выпускается оборудование, позволяющее выполнять такие наблюдений. Методы электрометрии позволяют лишь оценивать состояние закрепного пространства (выявлять обводненные участки либо сухие полости), однако обладают низкой помехоустойчивостью, и, кроме этого, окажутся чрезвычайно трудоемкими в плане выполнения полевых работ в действующих стволах.

Для обследования бетонной крепи шахтных стволов, как показали результаты анализа выполненных на модели опытных работ, наиболее подходящими являются два геофизических метода: георадиолокация с применением экранированного антенного блока 400 МГц и ультразвуковая томография. Однако, полевые работы в действующих калийных стволах указанными методами проводились и ранее, но результаты часто оказывались неудовлетворительными. Для повышения эффективности исследований, на наш взгляд, необходимо оценить технические и технологические особенности

стволов, которые могут оказать влияние на результаты применения геофизических методов. Кроме этого, в настоящее время нет рекомендацией по применению указанных методов в условиях шахтных стволов, т.е. не проведен подбор оптимальных параметров регистрации, позволяющих достичь оптимального соотношения шум/сигнал для уверенного выделения искомых объектов.

3. РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ БЕТОННОЙ КРЕПИ И ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Шахтный ствол калийного предприятия, как показано в разделе 1.2.1, это уникальное технологическое сооружение, как с точки зрения конструкции, так и условий эксплуатации. С одной стороны, многочисленные расстрелы и направляющие ствола сильно затрудняют не только проведение геофизических работ, но и интерпретацию данных. Второй момент эксплуатационный, и больше характерный для грузовых стволов. Так как руда вывозится на поверхность в скипах, периодические просыпи из них и просто соляная пыль, оседают на стенках ствола и образуют корку, толщина которой в некоторых участках достигает 5–10 см. Третий фактор связан с увлажнением стенок ствола (конденсат или вода с поверхности в результате интенсивных осадков).

Последним фактором следует отметить длительность времени на проведение геофизических работ, поскольку калийное предприятие работает круглосуточно, то и стволы постоянно задействованы для спуска/подъема руды, грузов или людей. По этой причине, калийщики крайне заинтересованы в сокращении времени, необходимого для проведения обследований.

3.1. Оценка условий проведения работ влияющих на качество данных

Оценка влияния армировки ствола на данные геофизики. Для оценки влияния армировки ствола на поверхности модели были разложены металлические объекты имитирующие те, которые имеются в стволах. Объекты расположены как вдоль профиля (имитация проводников), так и перпендикулярно (имитация расстрелов).

Съемка ультразвуковым томографом в непосредственной близости от металлических конструкций показала, что даже объекты расположенные на бетоне не оказывают никакого влияния на результаты съемки.

Георадиолокация была выполнены в двух вариантах: с прижатой к бетону антенной и на расстоянии около двух сантиметров над бетоном. Результаты съемки по этому профилю показаны на рисунке 3.1. Сравнение результатов показывает, что металл, расположенный вдоль или в крест профиля, при постоянном прижиме антенного блока к поверхности, значительного влияния на результаты не оказывает. Как только антенный блок «отрывается» от поверхности, запись становится не интерпретируемой. Из результатов данного этапа моделирования вытекает одно крайне важное условие проведения полевых наблюдений: *антенный блок должен на протяжении всего профиля быть плотно прижат к поверхности наблюдений*.

Оценка влияния соляной корки на результаты наблюдений. Для выполнения моделирования этого эффекта на поверхность бетона был нанесен слой соли. На первом этапе слой соли был около 1,5 см, на втором около 3 см.

Ультразвуковые исследования показали, что наличие даже тонкой соляной корки, не позволяет выполнять работы.

Работы методом георадиолокации выполнены по профилю, проходящему по всей длине модели. Результаты сравнения данных георадиолокации показаны на рисунке 3.2. Из представленных данных видно, что наличие корки толщиной около 1,5-2 см уже сильно скажется на результатах георадиолокации. Теряется четкость выделяемых ранее субгоризонтальных границ, границы аномалеобразующих объектов не определимы. В случае увеличения толщины соляной корки до 3 см на радарограмме из всех выделяемых объектов остались только слабые признаки аномалии, создаваемой канистрой № 3.

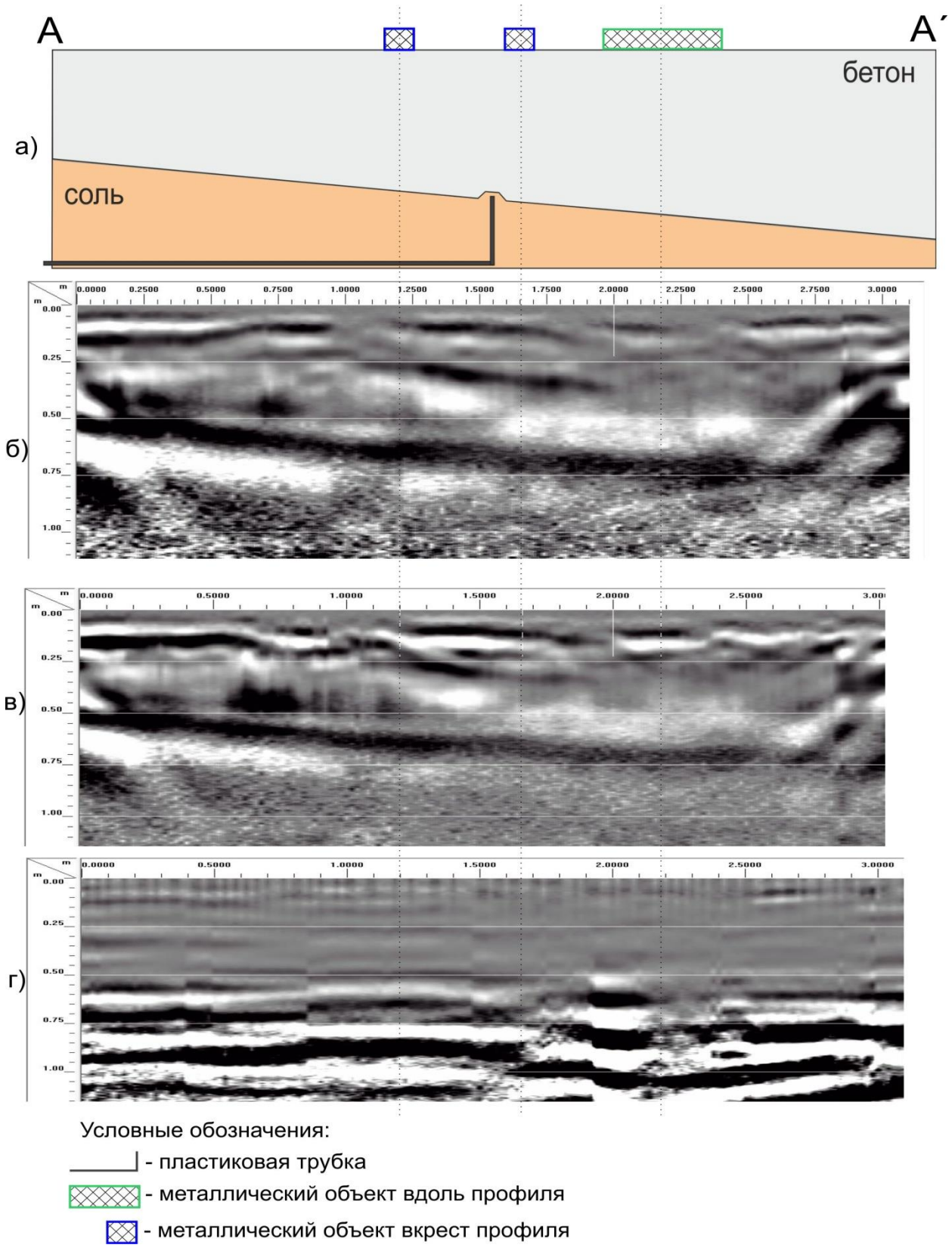


Рис. 3.1. Сравнение радарограмм: а) схема модели, б) съемка без металлических объектов на модели, в) съемка после расстановки металлических объектов, антенна прижата, г) съемка после расстановки металлических объектов, антенна на расстоянии 2 см от поверхности бетона

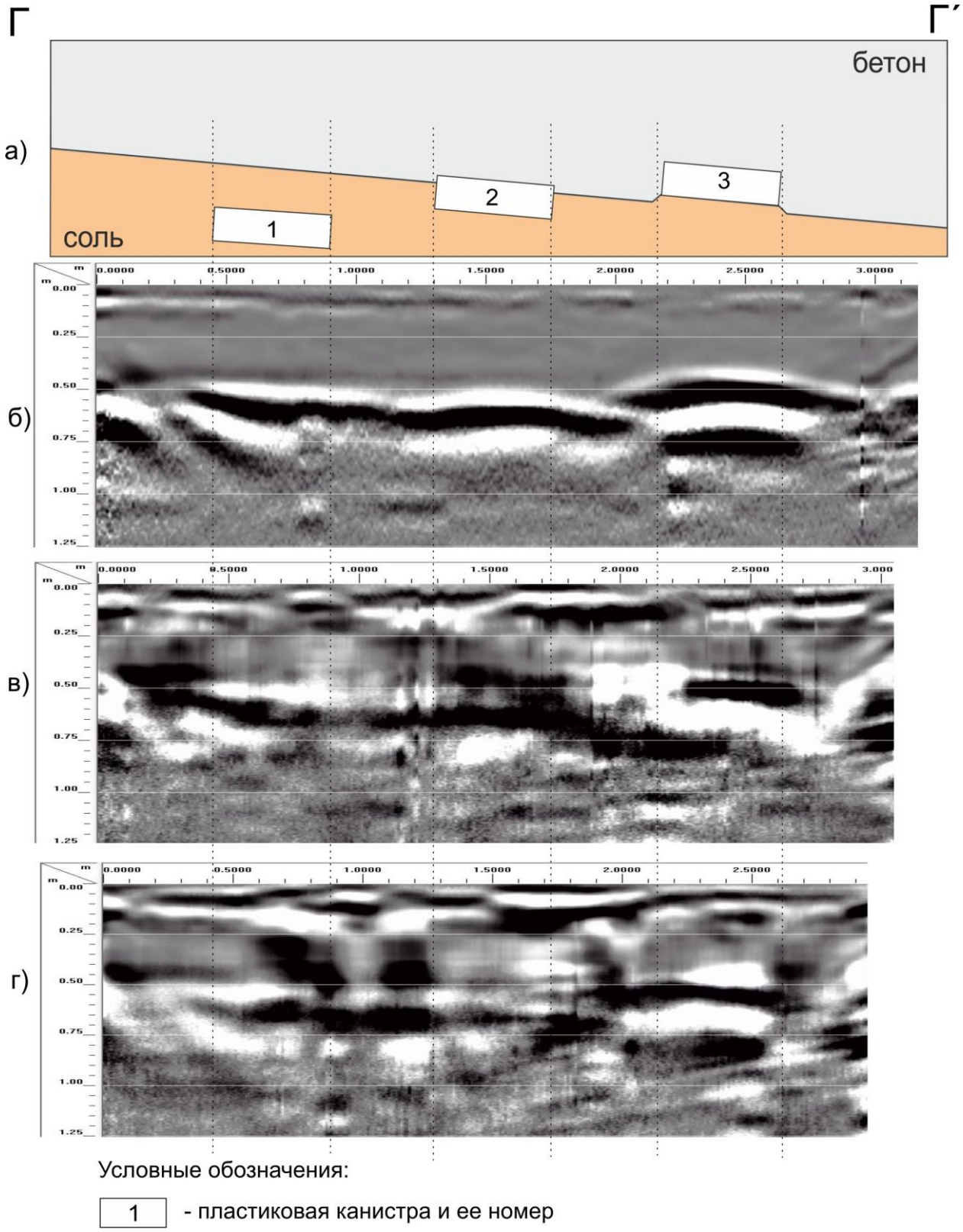


Рис. 3.2. Сравнение радарограмм: а) схема модели, б) съемка по чистой поверхности, в) съемка через слой соли около 1,5 см, г) съемка через слой соли около 3 см

Оценка влияния увлажнения стенок ствола на результаты съемки

Увлажнение поверхности модели выполнено дважды: первый раз на бетон нанесено незначительное количество воды, вызвав тем самым, незначительное увлажнение бетона.

Ультразвуковые исследования показали, что результаты по сухой и увлажненной поверхностям бетона практически идентичны. Незначительная разница в скорости волн и амплитуде сигнала объясняется погрешностью измерений. На рисунке 3.3 приведены В-сканы по сухой и увлажненной поверхностям.

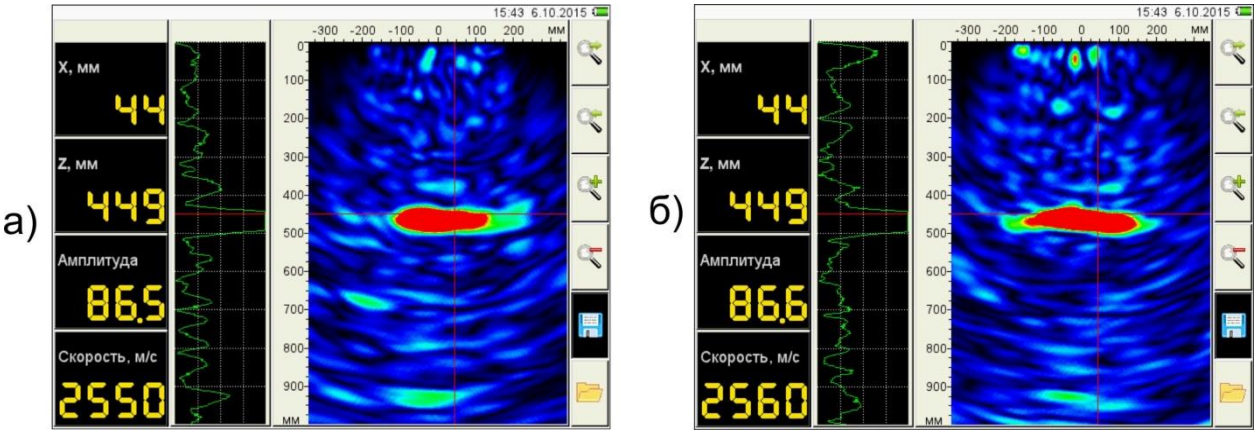


Рис. 3.3. Сравнение результатов УЗ томографии: а) съемка на сухой поверхности б) съемка на увлажненной поверхности

Результаты георадиолокации представлены на рисунке 3.4. Работы выполнены по тому же профилю, по которому проводилась оценка влияния соляной корки. По результатам видно, что значительных различий между двумя радарограммами нет. Все объекты уверенно регистрируют на обеих радарограммах. Незначительные отличия во внешнем виде радарограмм (особенно в верней части) объясняются работой автоматизированных процедур обработки данных (автоматическое усиление, удаление постоянной составляющей).

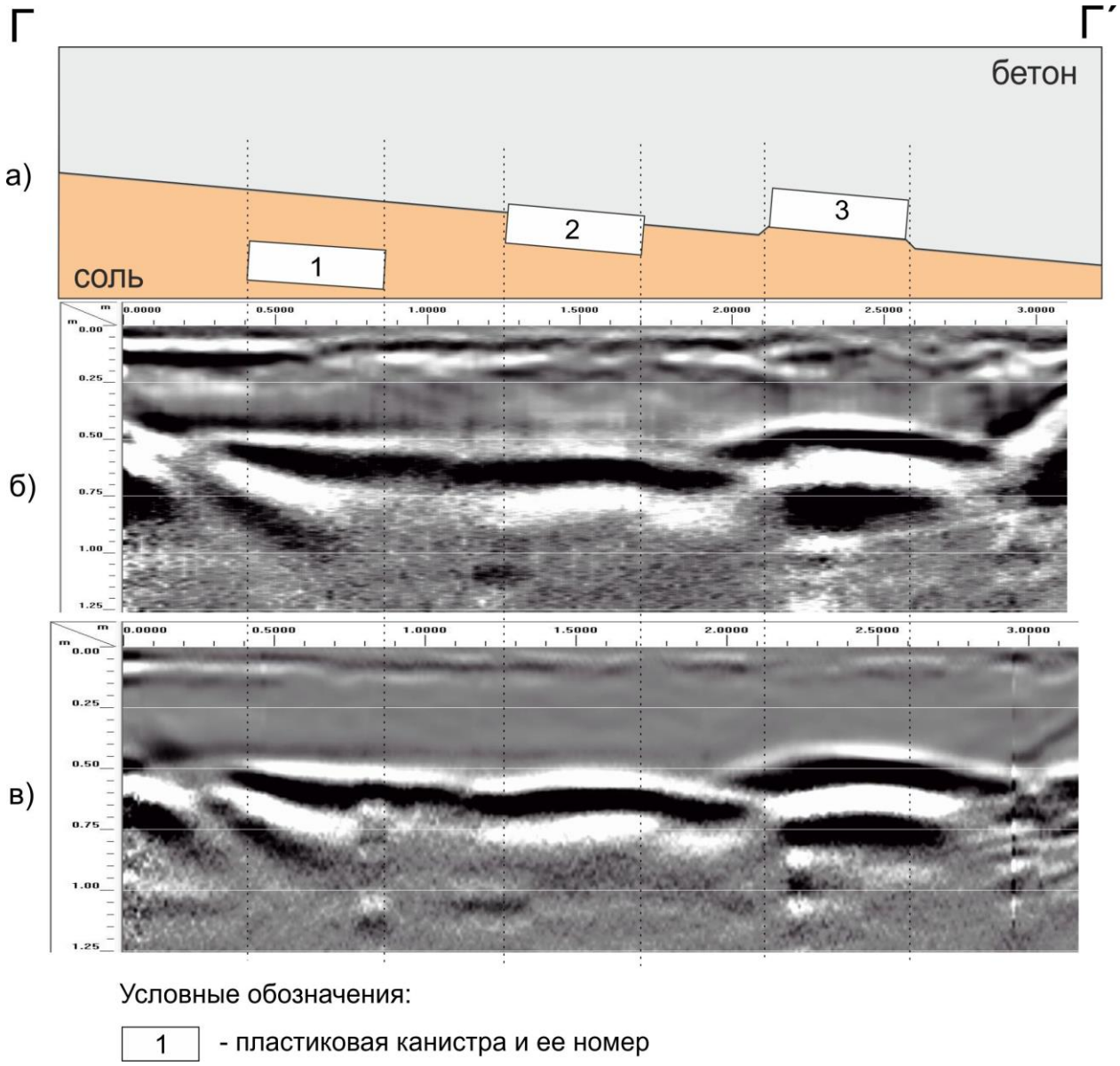


Рис. 3.4. Сравнение результатов георадиолокации: а) схема модели, б) съемка по сухой поверхности, в) съемка по увлажненной поверхности

Во втором случае на бетоне было разлито значительное количество воды, что привело к образованию луж на поверхности.

В соответствии с техническими характеристиками, работы томографом A1040 MIRA в таких условиях невозможны.

Результаты георадиолокации представлены на рисунке 3.5. Как и в случае упомянутом выше, работы выполнены по профилю, проходящему через пластиковые канистры. Установлено, что наличие большого количества воды

на исследуемой поверхности оказывает влияние на волновую картину, однако несмотря на это радарограмма остается интерпретируемой.

Таким образом, установлено, что для получения качественных полевых данных стенка ствола в изучаемом интервале должна быть очищена от штыба, кроме этого работы лучше проводить по сухой поверхности крепи, однако это не является обязательным.

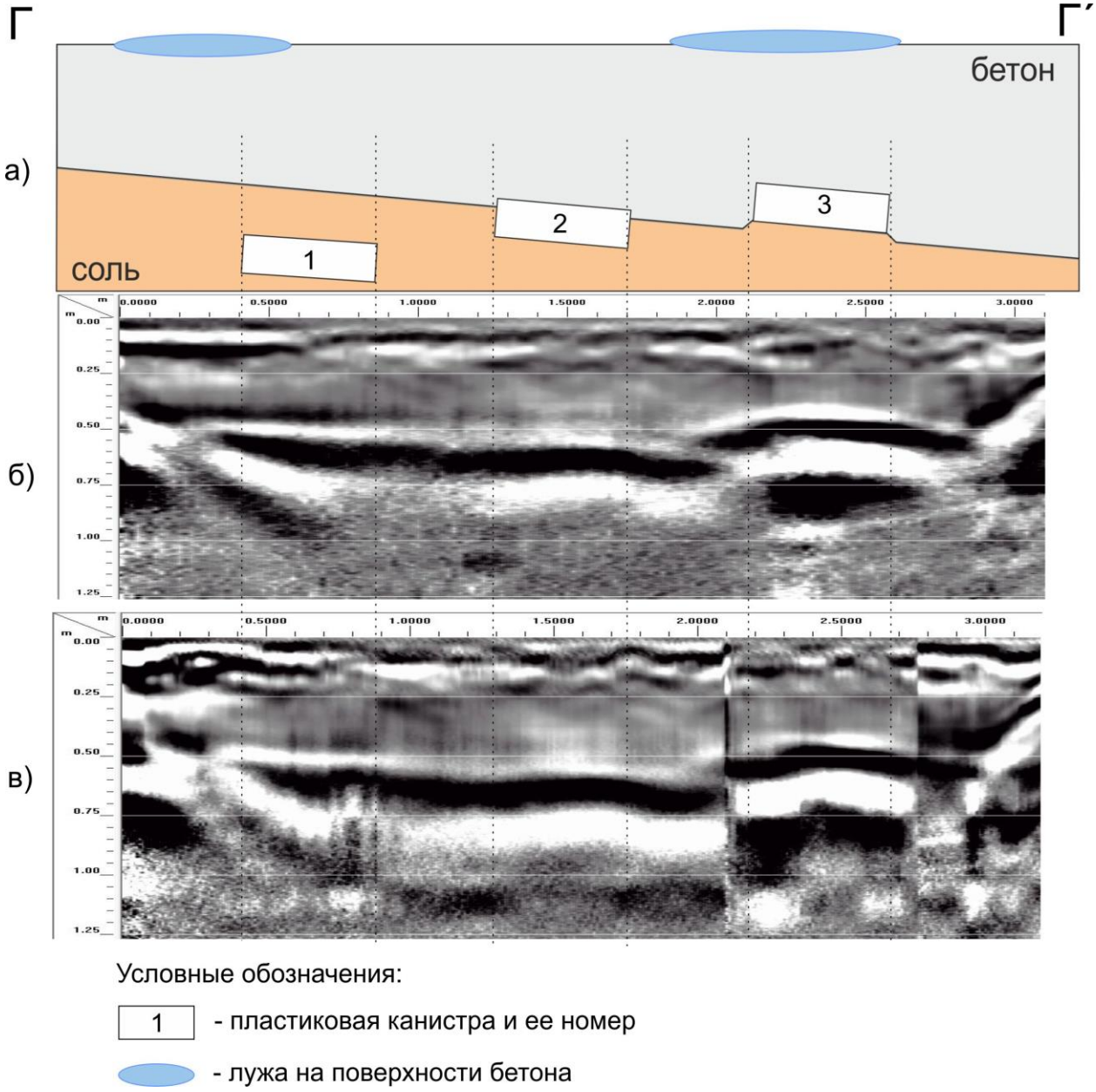


Рис. 3.5. Сравнение результатов георадиолокации: а) схема модели, б) съемка по сухой поверхности, в) съемка через лужи на бетоне

3.2. Адаптация методики наблюдений методом ультразвуковой томографии

Наиболее значимым фактором для проведения работ методом ультразвуковой томографии является шаг наблюдений. Производитель томографа A1040 MIRA рекомендует производить съемку по сети 100x100 мм. С целью определения возможности повышения производительности исследований с помощью томографа MIRA, проведены работы по разряженной сети наблюдений. Перед сравнением полученных результатов рассмотрим как изменяется покрытие съемкой исследуемой поверхности при изменении шага наблюдений. Прибор A1040 MIRA выполнен в прямоугольном корпусе размерами 380x140x130 мм. Внешний вид прибора показан на рисунке 3.6.

Рис. 3.6. Внешний вид низкочастотного ультразвукового томографа A1040 MIRA: а) лицевая сторона прибора, б) матричная антенная решетка [фото с сайта www.acsys.ru]

Измерительный блок содержит матричную антенную решетку из 48 низкочастотных широкополосных преобразователей поперечных волн с сухим точечным контактом. Размер антенной решетки составляет 330х75 мм. То есть если шаг съемки 100х100 мм, то кратность вдоль линий профилей будет более трех, а между профилями около 0,75.

На рисунках 3.7, 3.8 показано сравнение результатов работ по сети с шагом 100х100, 200х200 и 300х200 мм. На рисунке 3.7 показан разрез вдоль профиля съемки (линия Г-Г′), на рисунке 3.8 поперек профилей (линия Б-Б′). Сравнивая результаты вдоль линии Г-Г′, видно, что результаты наблюдений по сети 100х100 и 200х200мм практически идентичны, незначительные отличия проявляются только в четкости границ мелких объектов (засыпанная трубка в центре и канистра выступающая из соли на 30–40-мм). Результаты по сети 300х200мм обладают уже гораздо меньшей точность, что хорошо заметно по смещению границ выделенных объектов. Так положение пластиковой канистры в конце профиля не соответствует действительному примерно на 200 мм (около 50% ее размера). Результаты вдоль линии Б-Б′ (поперек профилей), так же показывают ухудшение результатов с увеличением шага съемки. При шаге 300х200 (рис. 3.8, *в*) уверенно различим только один конец деревянного бруска, тогда как при меньшем шаге съемки четко различимы и начало и конец. Второй важной особенностью является искажение формы границ, которое может возникать при увеличении шага съемки. Так при шаге 200х200 мм отражение от границы бетон-соль, в интервале между бруском и углублением в соли расположено практически горизонтально, тогда как реальная граница расположена под наклоном, что видно при шаге 100х100 мм.

Резюмируя вышесказанное можно заключить, что оптимальный шаг съемки должен выбираться опытным путем индивидуально для каждого объекта и необходимой точности. Опытные работы позволили сделать вывод, что при исследовании бетонной крепи оптимальным является шаг 200х100 мм (где 200 мм – шаг пикетов воль профиля, 100 мм – расстояние между профилями).

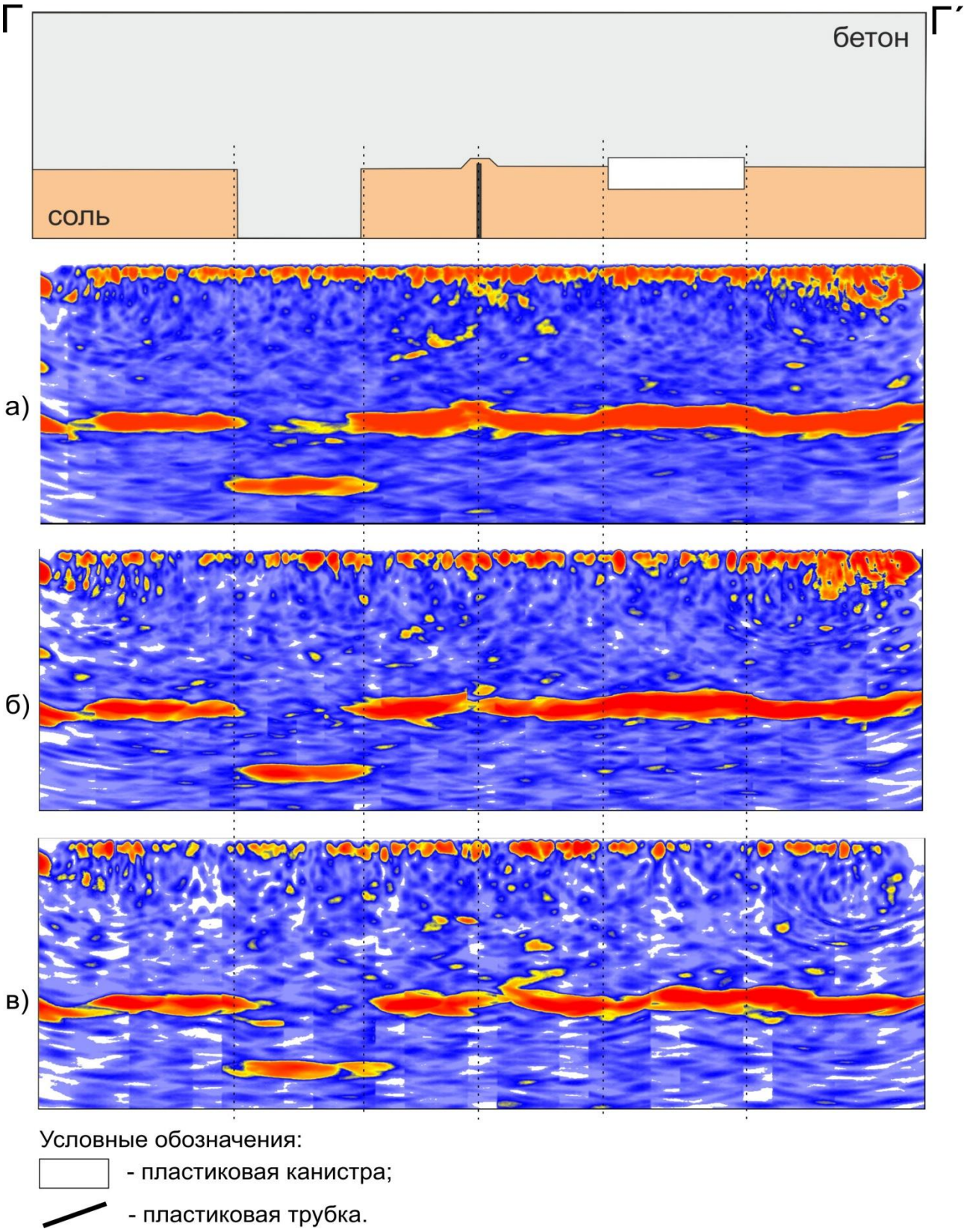


Рис. 3.7. Сравнение результатов съемки с различным шагом: а) 100х100 мм, б) 200х200мм, в) 300х200 мм

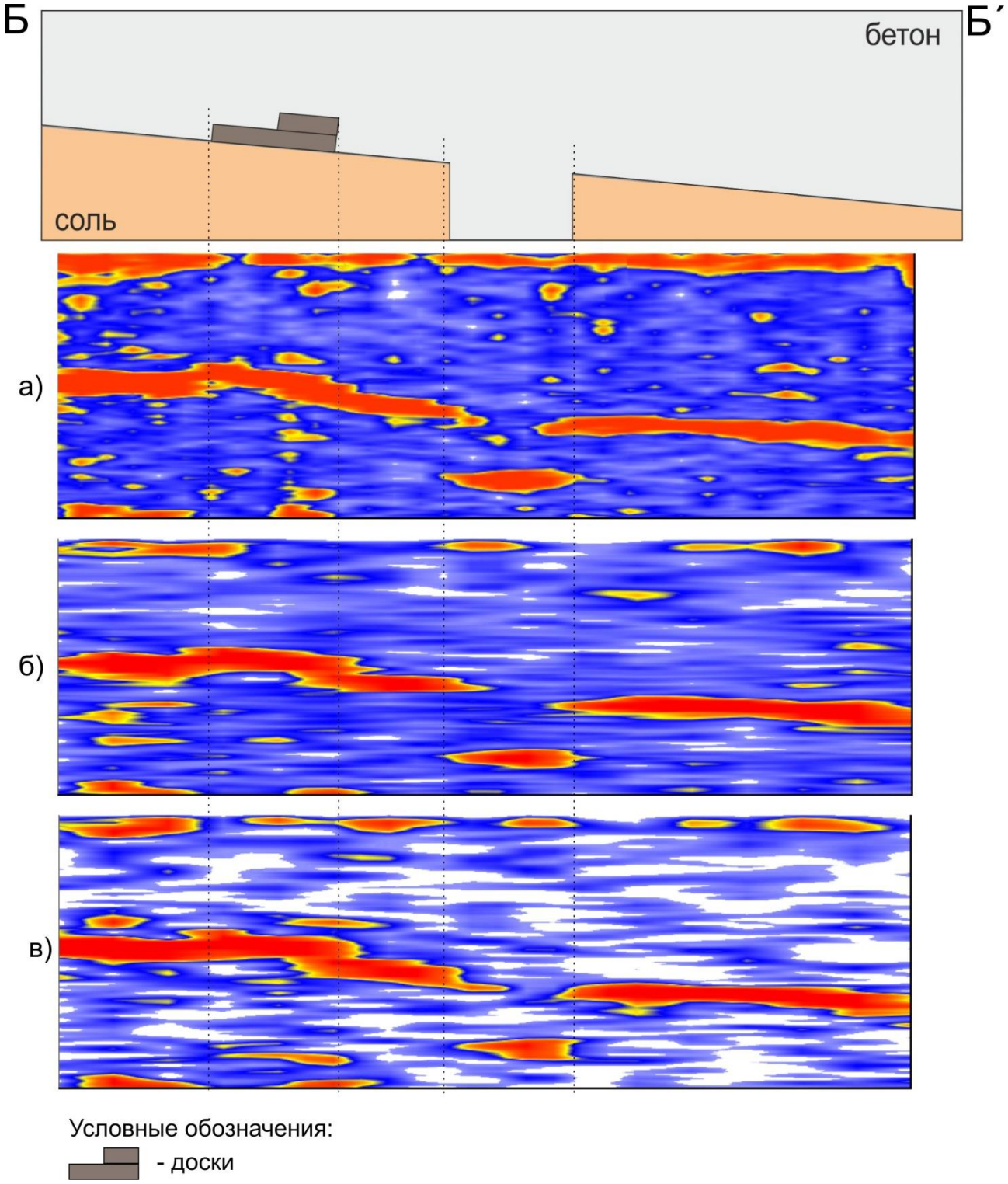


Рис. 3.8. Сравнение результатов съемки с различным шагом:

а) 100х100 мм, б) 200х200мм, в) 300х200 мм

3.3. Адаптация оборудования и методики наблюдений метода георадиолокации

В отличии от ультразвуковой томографии, для георадиолокации значение имеет только расстояние между профилями и, как следствие, количество профильных линий на исследуемой площади. В общем случае расстояние между профилями должно быть сопоставимо с глубиной исследований, т.е. 0,5–1 м. Шаг по профилю в большей степени определяется возможностями аппаратуры. Большая часть опытных работ проведена с шагом между точками наблюдений 1–2 см. Такой шаг является достаточным для решения поставленных задач и позволяет выполнять съемку георадаром SIR-3000 со скоростью до 1 м/с.

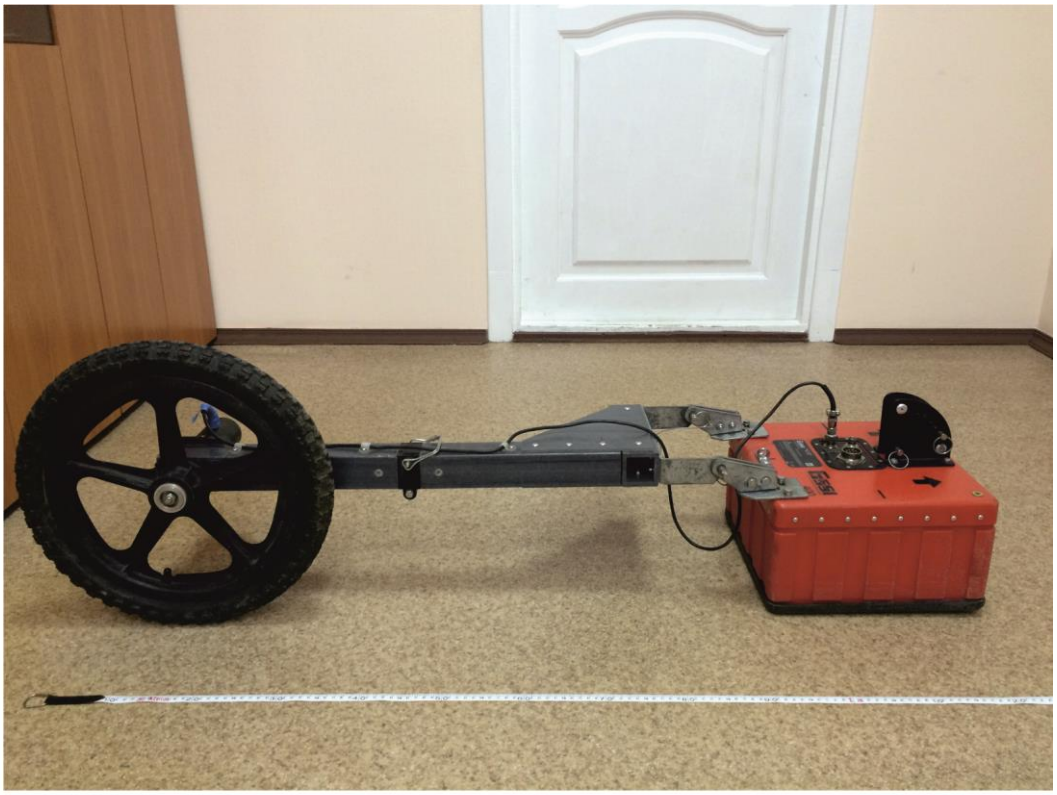
Основные трудности при работе георадаром в условиях шахтных стволов связаны с привязкой данных наблюдений. Дело в том, что производитель радаров SIR-3000 (фирма GSSI), поставляет с антенным блоком 400 МГц только один вид колеса-одометра (рис. 3.9 *а*). Такое колесо одометр предусматривает работу только на горизонтальной поверхности. Для работ по вертикальным поверхностям компания «Geoscanners AB» разработало специальный «карт» – тележку-одометр (рис. 3.9 *б*). Недостатком второго одометра является то, что антенный блок будет находиться на расстоянии от поверхности крепи около 2 см, при этом на радарограммах будут регистрироваться многочисленные отражения от объектов расположенных в стволе (проводники, расстрелы, канаты, подъемные сосуды). Так как эти объекты будут именно воздушными волнами помехами, выявить их на радарограммах возможно, но качество данных ухудшится.

Нитяной одометр отчасти решает проблему привязки данных, но усложняет производство работ, так как не всегда есть к чему привязать нить в начале профиля.

Режим регистрация по «времени» накладывает ряд условий, главным из которых является плавность и равномерность перемещения антенного блока по

поверхности, что не всегда возможно, так как оператор перемещается вместе с антенной стоя на крыше подъемного сосуда.

а)



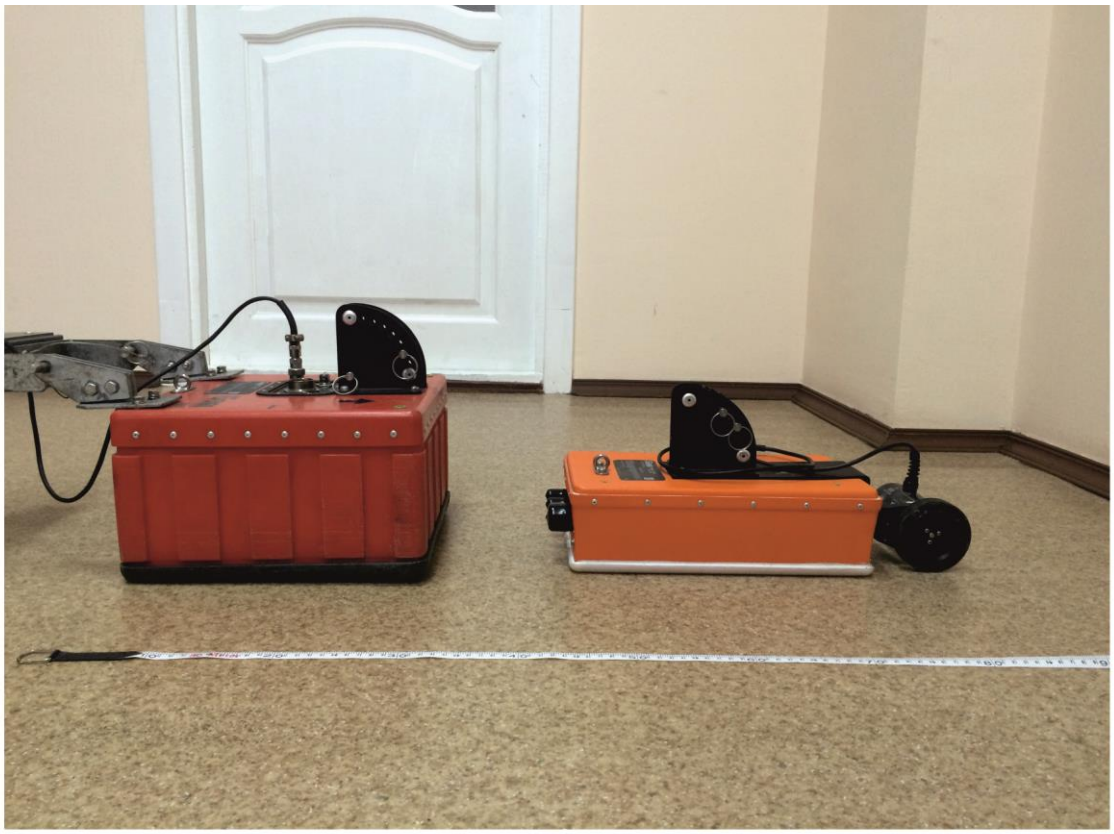
б)

Рис. 3.9. Антенный блок с колесом-одометром: а) колесо-одометр производства американский фирмы GSSI, б) тележка с одометром производства шведской фирмы Geoscanners AB

Для решения задачи привязки данных, авторами работы предлагается модифицировать «колесо-одометр» от антенного блока 900 МГц для работы с антенной 400 МГц. Опытным путем установлено, что электроника и разъемы для подключения, установленные на этом колесе-одометре полностью совместимы с антенным блоком 400 МГц. На рисунке 3.10 показаны рассматриваемые антенные блоки. Колесо одометр антенного блока 900 МГц съемное и представляет собой непосредственно, колесо зафиксированное на крепежной планке. Планка выполнена из металла вследствие чего, ей возможно придать любую необходимую форму. На рисунке 3.11 показана схема колеса одометра с планкой адаптированной под антенный блок 900 МГц и размеры планки после того как ее распрямили. На рисунках 3.12–3.13 показаны схемы крепления данного одометра на антенный блок 400 МГц.

Предложенная схема позволяет подвесить колесо к передней части антенного блока. В свободном положении, колесо выступает за нижнюю точку антенного блока примерно на 2 см. Таким образом, пружинный механизм колеса сохраняется, что обеспечит уверенный прижим даже на неровных поверхностях.

а)



б)

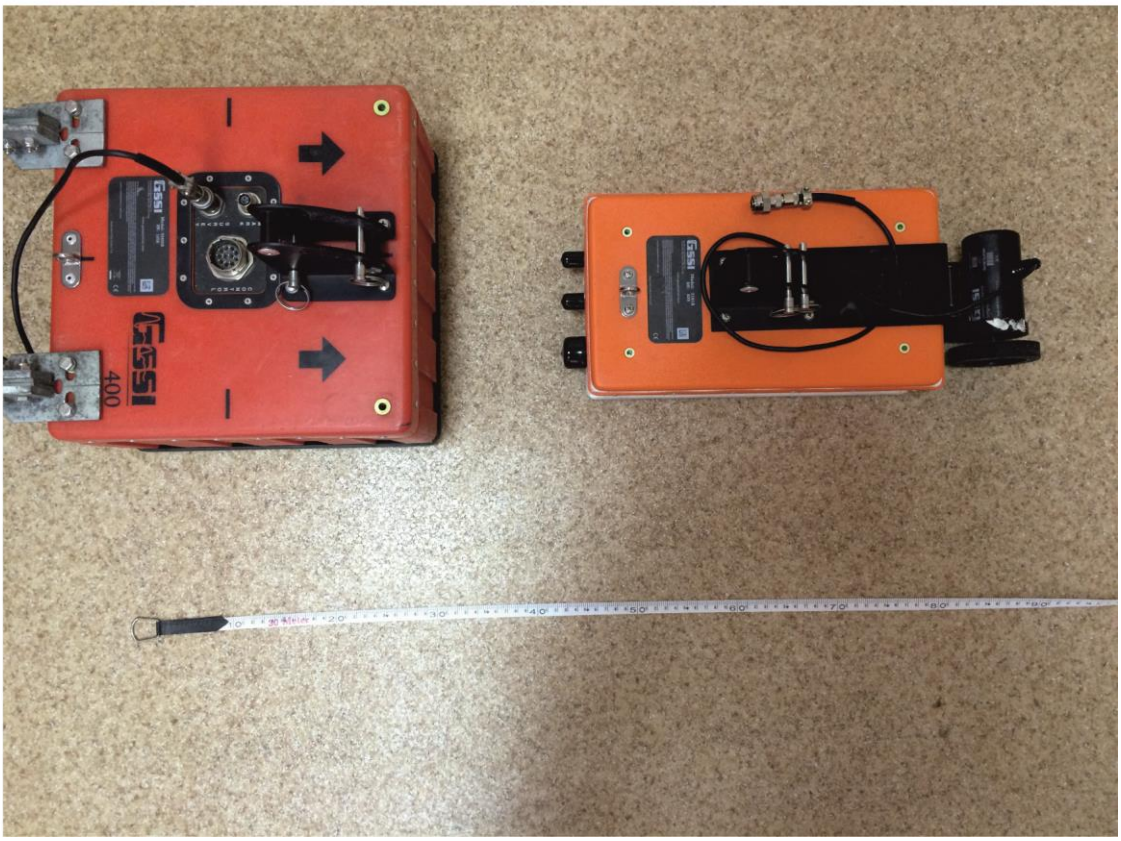


Рис. 3.10. Сравнение антенных блоков: слева АБ 400 МГц, справа АБ 900 МГц с одометром

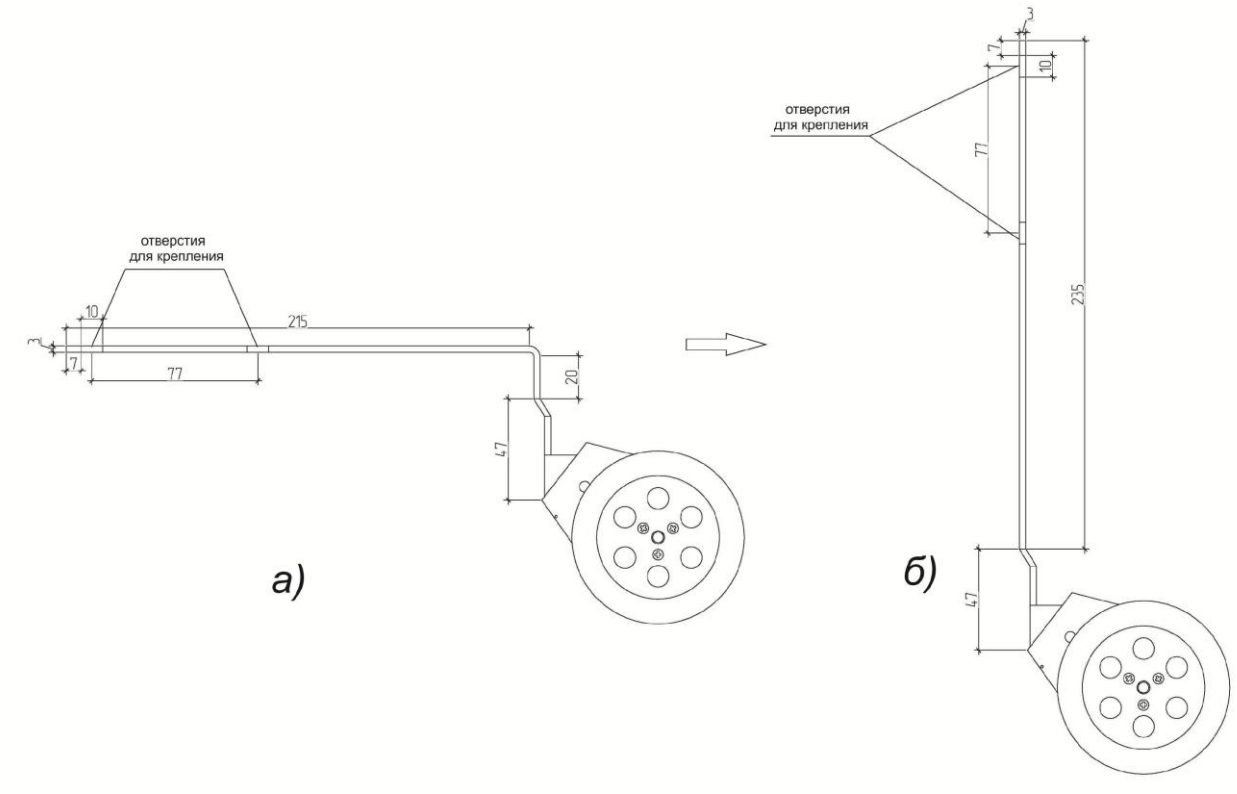


Рис. 3.11. Колесо одометр: *а*) адаптированный под антенный блок 900 МГц, *б*) тот же в распрямленном виде

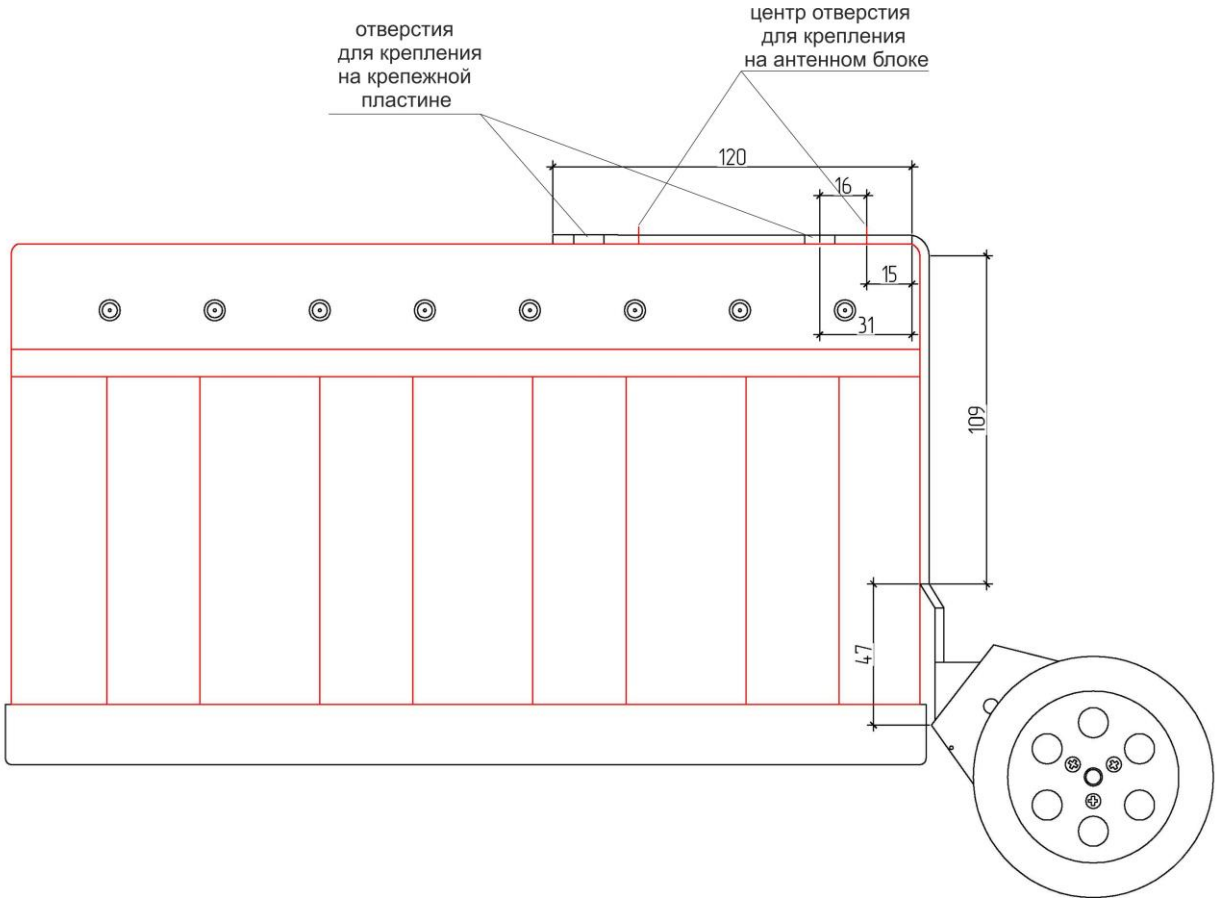


Рис. 3.12. Антенный блок с одометром вид сбоку

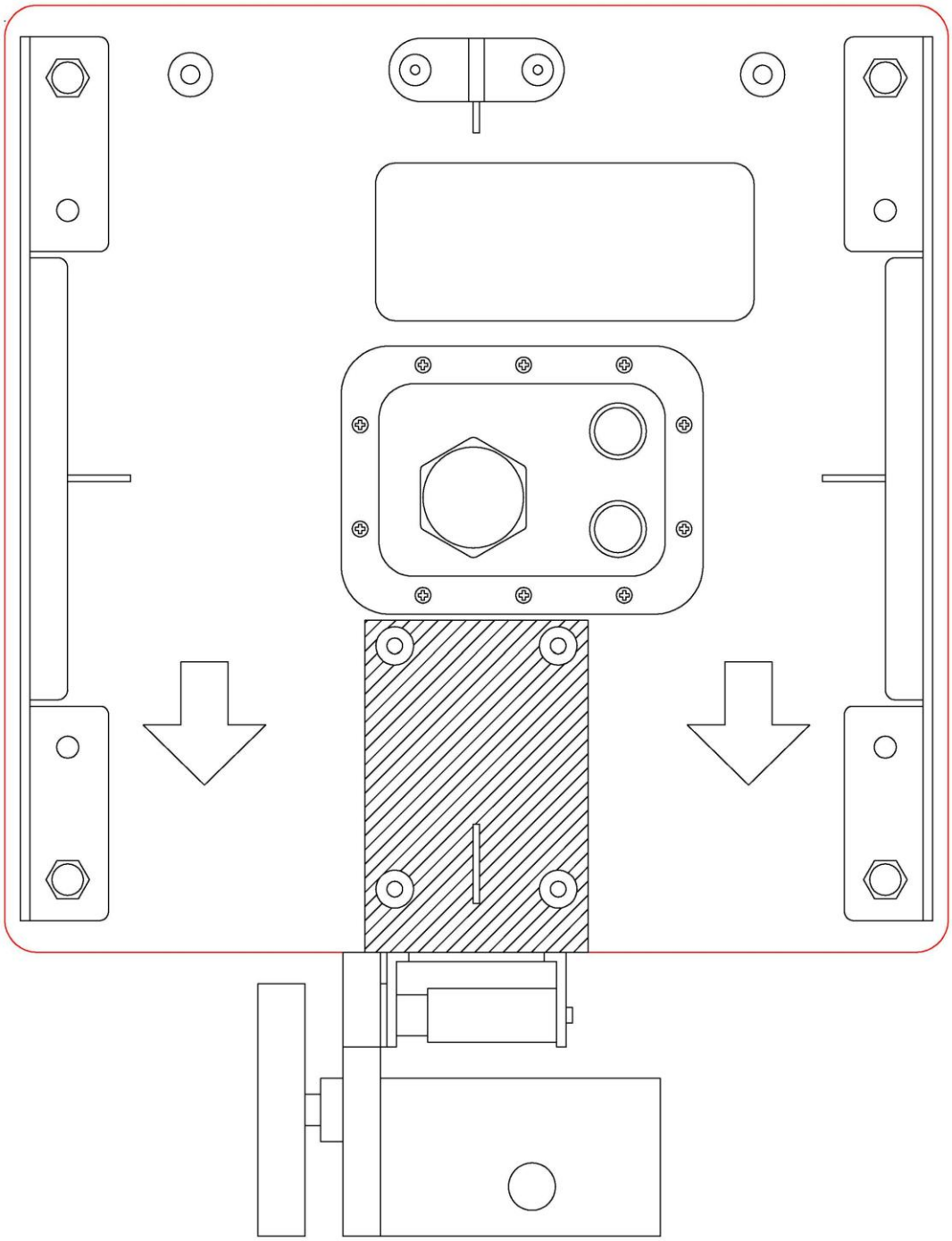


Рис. 3.13. Антенный блок с одометром вид сверху

3.4. Анализ результатов опытных работ в действующем стволе рудника СКРУ-3

Общие сведения об участке исследований

Опытные геофизические исследования проведены в стволе № 3 рудника СКРУ-3. Работы выполнены по серии профилей в зумпфовой части ствола. Схема профилей приведена на рисунке 3.14.

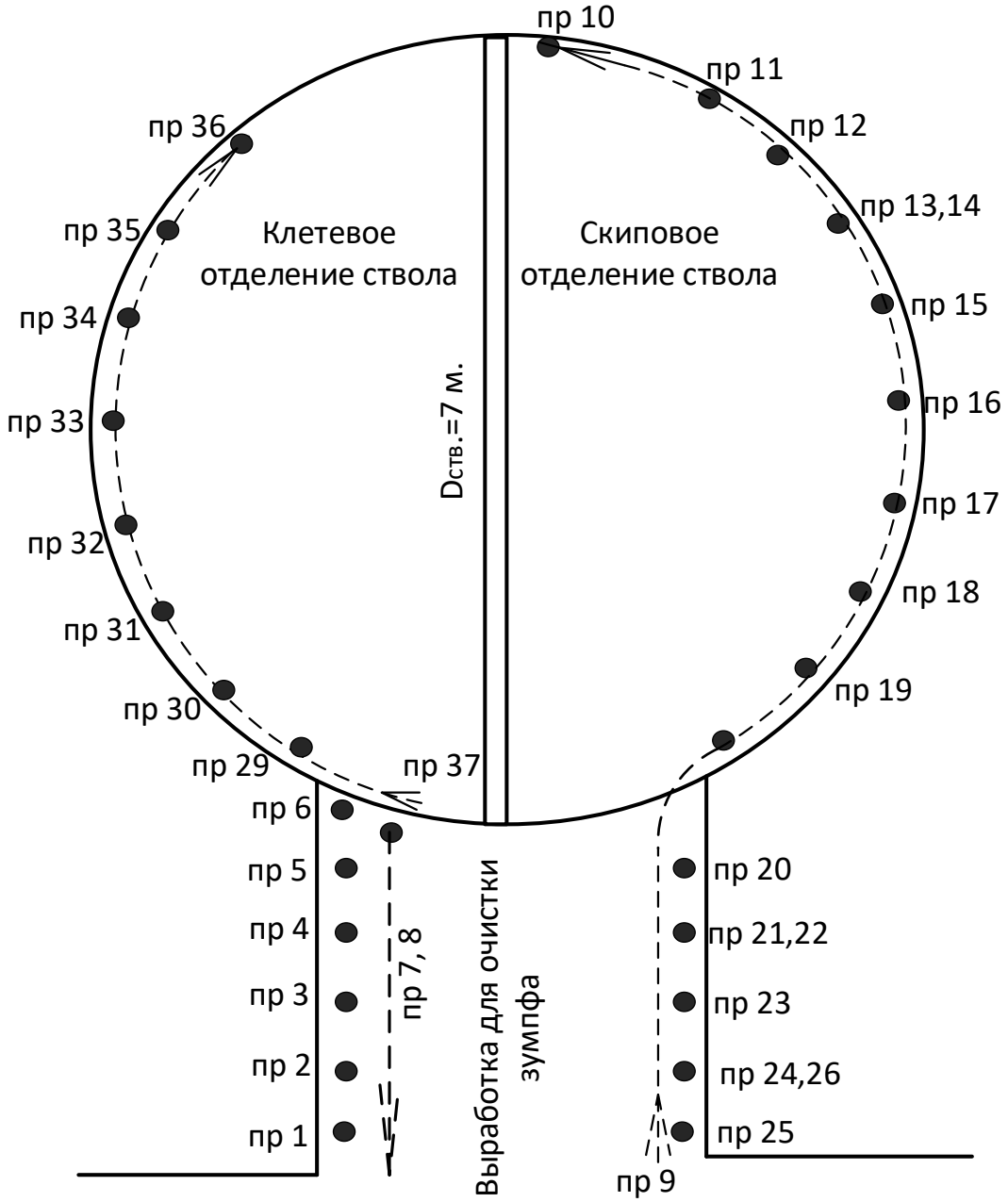


Рис. 3.14. Схема георадарных профилей в стволе № 3[56]

Перед выполнением работ зумпфовая часть была, насколько это возможно, очищена от соляной корки силами работников СКРУ-3. Полностью удалить соляную корку получилось не на всей площади, местами она оставалась в виде локальных натеков. Практически вся поверхность бетона была увлажнена насыщенным соляным раствором.

В среднем мощность бетона на участке опробования по проекту должна была составлять 50 см. Фактически же, в ряде мест целостность бетона была нарушена, и уменьшалась до 10-20 см. Нарушения целостности позволили оценить точность определения мощности бетона, выполняемой по георадарным и томографическим данным.

Георадиолокация

В результате физического моделирования установлено, что георадиолокация - наиболее подходящий метод при исследовании бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов. Опытные работы в стволе выполнены георадаром SIR-3000 производства фирмы GSSI (США) с применением экранированного антенного блока с центральной частотой 400 МГц. Запись сигнала осуществлялась по времени. По этой причине, с целью уменьшения зависимости результатов от равномерности перемещения антенного блока, большая часть работ выполнена по коротким вертикальным профилям (до 2 метров), и несколько профилей – в горизонтальном направлении. Шаг между профилями в среднем составлял 1 метр.

В результате обработки данных георадиолокации получены радарограммы отражающие внутреннее строение бетонной крепи и ее толщину.

На большей части радарограмм, согласно рисункам 3.15, 3.16, отчетливо отмечается граница бетон-соль, что указывает на **высокую эффективность** рассматриваемого метода. В ряде случаев отмечены неоднородности в толще бетона, представленные, скорее всего, крупными включениями, типа речной гальки, наблюдаемой на поверхности бетона визуально. Пример такой неоднородности так же приведен на рисунке 3.15.

Особый интерес с практической точки зрения представляют неоднородности на границе бетон-соль. На радарограмме по профилю 24 (рис. 3.16) представлены сразу два таких участка. Оба выделяются по изменению волновой картины, как высокоамплитудные области дифракции. С большой степенью вероятности можно утверждать, что выявленные области связаны с полостями на границе «бетон-соль». Однако, определить размеры неоднородностей затруднительно вследствие того, что регистрация осуществлялась «по времени».

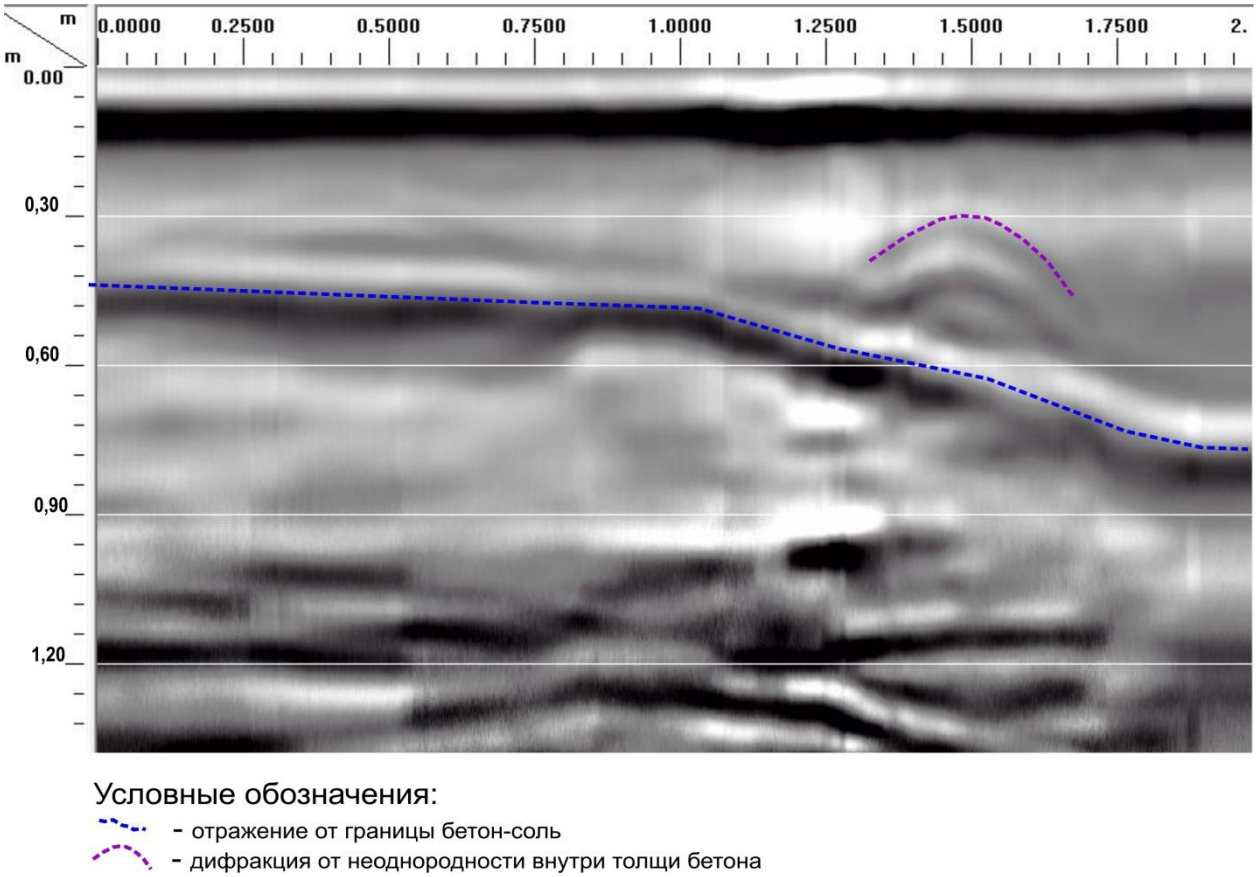


Рис. 3.15. Георадарный разрез по профилю 35

Анализ результатов опытных работ подтверждает выводы, сделанные по результатам физического моделирования:

- отрыв антенны от поверхности при выполнении зондирования приводит к браку, получаемого материала;

- соляная корка оказывает значительное влияние на качество материала, поэтому, она либо должна быть сухая, либо ее необходимо удалять перед работой;

- влажная, но свободная от соляной корки поверхность мало сказывается на качестве материалов;

- запись рекомендуется вести с одометром, наиболее удобным в эксплуатации является колесо диаметром 5-10 см, менее удобным, но приемлемым – нитяной одометр;

- колесо одометра должно быть подпружиненным, чтобы реагировать на неровности бетона крепи при перемещении антенны по поверхности;

- метод показывает высокую оперативность и информативность, при относительно несложной методике обработки материалов.

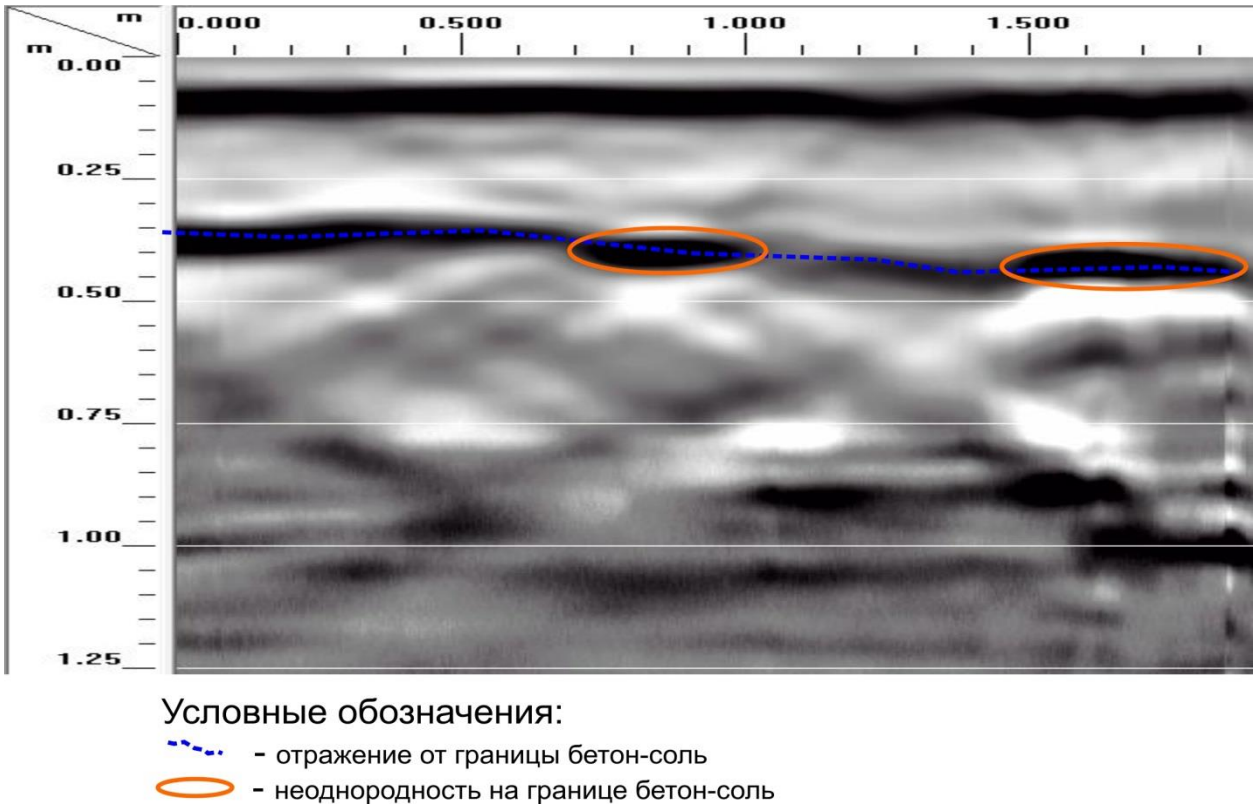


Рис. 3.16. Георадарный разрез по профилю 24 [16]

Ультразвуковая томография

Работы методом ультразвуковой томографии проведены по отдельным профильным линиям, для построения акустических разрезов, как показано на рисунке 3.17. Работы в площадном варианте на большей части крепи невозможны из-за значительной коррозии поверхности бетона, и невозможности качественно убрать соляную корку. Кроме этого, в отдельных точках выполнены зондирования (В-сканы), согласно рисунку 3.18.

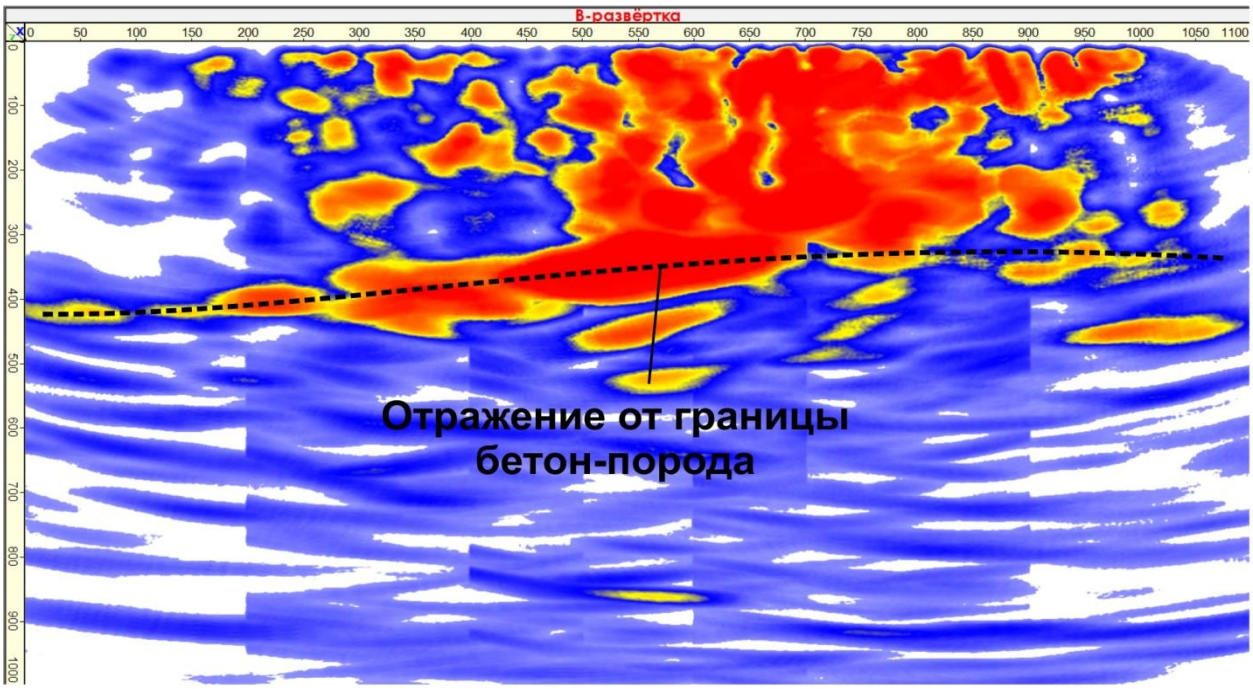


Рис. 3.17. Пример акустического разреза, отражения выше границы бетон-порода вызваны наличием в бетоне большого количества заполнителя крупного размера (гальки размером 5–10 см)

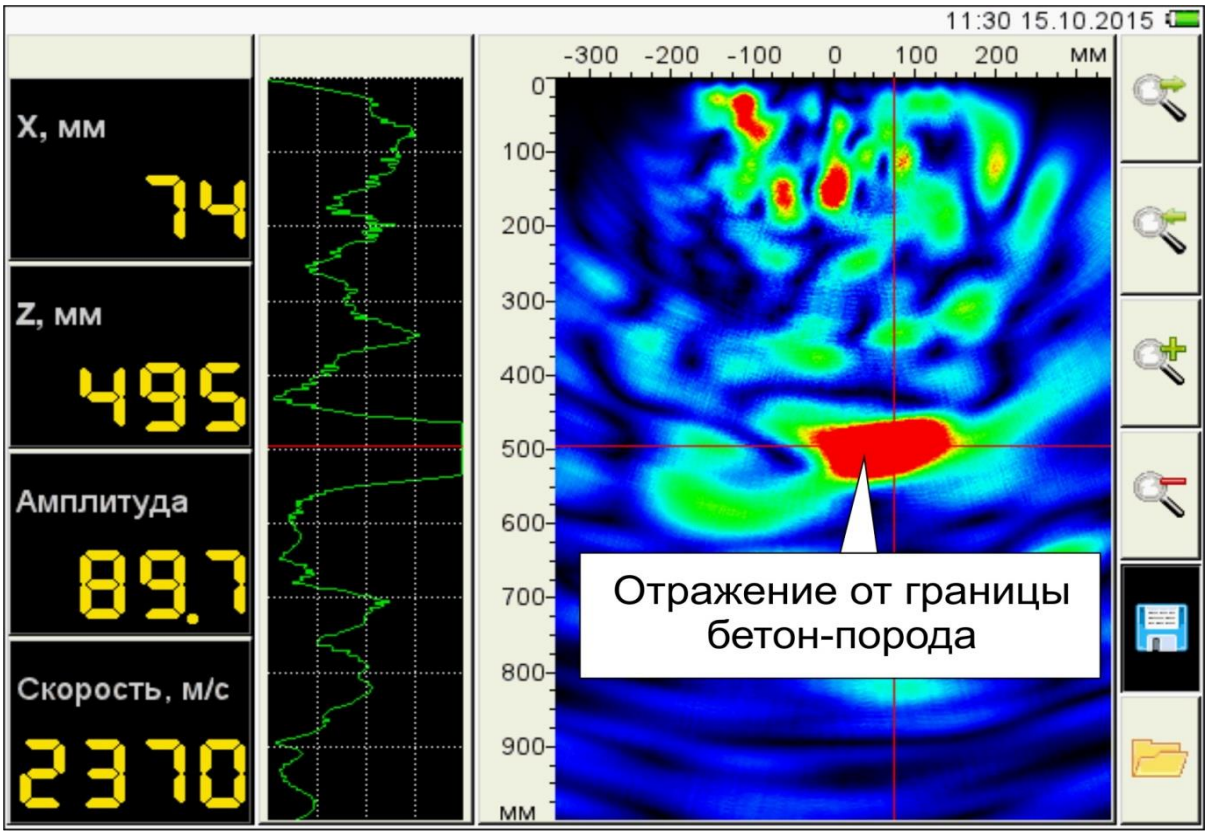


Рис. 3.18. Пример В-скана, отчетливо видно отражение от границы бетона, а так же отражения от заполнителя практически по всей толще бетона

По результатам опробования акустического томографа в условиях действующего ствола соляного рудника можно сделать следующие выводы:

- даже после очистки поверхности бетона от соляной корки очень сложно найти место для качественного прижима прибора к поверхности, как результат – применять томограф возможно лишь точечно в режиме В-скана, и изредка – в площадном режиме для получения разрезов вдоль линий;
- точность определения мощности бетона у томографа выше, чем у георадара, поскольку томограф сам определяет скорость распространения упругих волн в бетоне;
- основной режим работы, рекомендуемый для акустического томографа – точечное определение мощности бетона в пределах георадарных профилей, для привязки результатов георадиолокации по глубине.

Комплексный анализ результатов.

Комплексный анализ данных, представленный на рисунке 3.19, указывает на высокую сходимость результатов георадиолокации и акустической томографии в части определения мощности бетонной крепи.

Так же необходимо отметить более высокую разрешающую способность акустического томографа по сравнению с георадаром с антенной 400 МГц – на акустическом разрезе отмечаются множество отражений от заполнителя (щебня и гальки), чего нельзя сказать о георадарном разрезе.

По результатам анализа результатов сделаны следующие выводы:

- методы георадиолокации и акустической томографии рекомендуется применять в комплексе;
- георадиолокацию рекомендуется применять, в профильном режиме;
- акустическую томографию рекомендуется применять точечно или в профильном режиме с основной целью – повысить точность привязки георадарных данных по глубине.

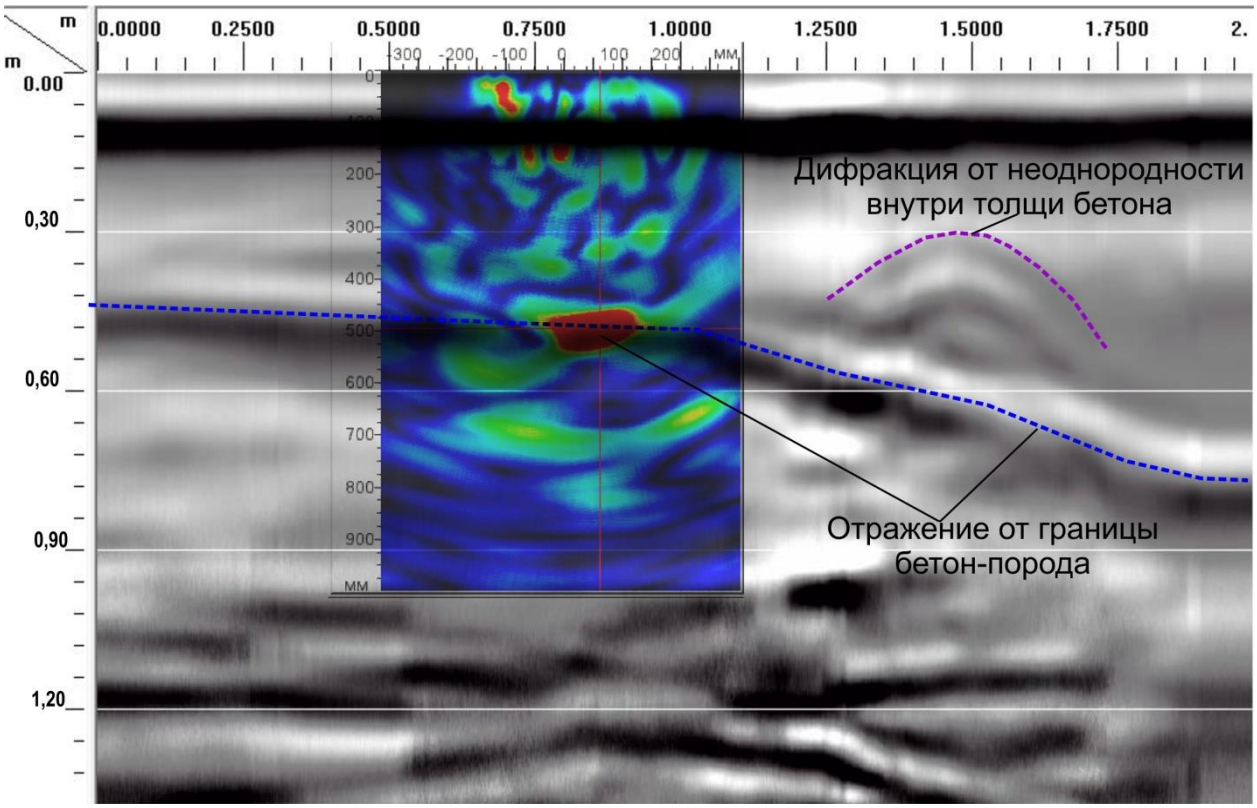


Рис. 3.19. Результат комплексного анализа данных георадиолокации и акустической томографии [16]

3.5. Технология диагностики бетонной крепи шахтных стволов геофизическими методами

В результате проведения физического моделирования и опытно-промышленных испытаний разработана методика диагностики бетонной крепи шахтных стволов, включающая в себя два геофизических метода:

- георадиолокация с антенным блоком 400 МГц;
- ультразвуковая томография прибором A1040 MIRA.

Георадиолокация позволяет выявлять полости в бетонной крепи и закрепном пространстве, производить оценку изменения мощности бетонной крепи. Ультразвуковые исследования позволяют детально изучать строение бетонной крепи (выявление трещин, других внутренних дефектов), а так же точно определять мощность бетона крепи.

Предлагается использовать георадиолокационный метод в профильном варианте, как наиболее оперативный, для первоначальной оценки относительно больших участков крепи. На участках с аномальным строением предлагается выполнять детализацию с помощью площадной георадарной съемки и площадной же акустической томографии. Такой подход позволит максимально эффективно использовать очень небольшой, как правило, лимит времени, выделяемый на проведение работ в стволе.

В случаях, когда акустическую томографию невозможно применить в площадном режиме из-за плохого качества поверхности бетона, необходимо применять ее хотя бы в режиме одиночных зондирований для качественной привязки по глубине данных георадиолокации.

Георадиолокационные исследования.

Перед проведением георадиолокационных работ в обязательном порядке необходимо произвести очистку интересуемого интервала крепи от штыба. Несоблюдение данного требования, как показали наши исследования, может привести к полной некондиционности получаемого материала.

Для проведения работ рекомендуется применение экранированных антенн с центральной частотой 400 МГц.

Работы проводятся по серии субвертикальных профилей. Шаг между профилями выбирается исходя из конкретных условия участка исследований. При возможности доступа ко всей поверхности крепи шаг между профилями должен быть не более 1 м.

При проведении работ обязательным условием является плотный и постоянный контакт антенны с бетоном. Участки, где плотный контакт соблюсти не удается, необходимо помечать как сомнительного качества, и оценивать качество записи на них с учетом отсутствия контакта. Как показали опытные работы на модели и в стволе, зазор всего в 2 см между антенной и бетоном приводит к полной некондиционности результатов.

Для измерения расстояния (привязки данных наблюдений) рекомендуется использование одометров. Наиболее удобным с точки зрения оперативности проведения съемки, является «колесо-одометр». Применение одометров нитяного типа так же допустимо, но их использование влияет на время проведения исследований за счет постоянных задержек связанных с необходимостью крепления нити в начале профиля.

При отсутствии технической возможности, запись может осуществляться «по времени». В случае регистрации «по времени» необходимым условием является плавность и постоянная скорость перемещения антенного блока. Кроме этого, при этом способе записи рекомендуется разбивать длинный профиль на серию более коротких (до 10 м), это позволит повысить точность привязки результатов, и избежать рывков на записи, появляющихся при остановке прибора.

В таблице 3.1 приведены оптимальные параметры регистрации на примере радара SIR-3000.

Таблица 3.1

Рекомендуемые параметры регистрации

№ п/п	Параметр	Оптимальное значение	Примечание
1	Samples (количество точек на трассу)	1024	
2	Range (длина записи)	50 нс	
3	DIEL (диэлектрическая проницаемость среды)	14	При скорости волн 8см/нс
4	SCN/UNIT (трасс на метр)	50	

Обработка данных может быть выполнена в программах «RADAN 7», «RadExplorer» либо им аналогичных. Параметры процедур обработки выбираются интерпретатором в зависимости от характеристик записи.

В набор процедур обработки материалов зондирования бетонной крепи, как правило, входят следующие:

- удаление «звона антенны» - подавление прямой волны – требует осторожного применения, поскольку может значительно подавить не только прямую волну, но и другие субгоризонтальные оси синфазности;

- полосовая фильтрация – параметры подбираются опытным путем так, что бы подавить высокочастотный дребезг и низкочастотный шум, основой для подбора является центральная частота антенны, которую подавлять нельзя;

- деконволюция – расширение спектра сигнала – параметры подбираются опытным путем так, что бы сохранить общие особенности записи, максимально сжав при этом сигнал;

- амплитудная регулировка или усиление сигнала – параметры подбираются так, что бы выровнять амплитуду записи по времени, и при этом сохранить относительное изменение амплитуды записи вдоль профиля; для этого рекомендуется использовать одинаковый закон усиления для всех трасс разреза.

Интерпретация результатов георадиолокации заключается в определении скорости распространения упругих волн по годографам дифрагированных волн, привязке осей синфазности к физическим границам на основе полученных скоростей, а так же на основе данных акустической томографии, выделении участков аномального строения бетона и закрепного пространства.

Наибольший интерес представляют участки уменьшения мощности бетона, выявляемые по форме осей синфазности, участки наличия полостей и неоднородностей в бетоне и закрепном пространстве, выделяемые по годографам дифрагированных волн и по форме осей синфазности, участки бетона с повышенной влажностью, выделяемые по повышению амплитуды записи.

Ультразвуковые исследования.

Ультразвуковые исследования рекомендуется выполнять на базе ультразвукового томографа A1040 MIRA, либо аналогичного.

Основным условием получения качественных результатов является очистка от штыба участков крепи, где планируется проведение ультразвуковых исследований. После очистки наносится разметка, соответствующая шагу съемки.

Для удобства анализа результатов, и максимальной представительности результатов, работы выполняются в режиме «карта». Шаг съемки рекомендуется 200х100 мм.

Для оценки мощности бетонной крепи возможно выполнение работ в режиме «В-скан», в таком режиме работы выполнятся не по регулярной сети, а по отдельным интересующим точкам, либо по точкам, к которым существует доступ. Основная цель таких работ – это повышение точности привязки результатов георадиолокации по глубине.

Незначительная влажность бетонной крепи практические не оказывает влияния на качество данных как ультразвуковой томографии. Сильное увлажнение (поток воды) не позволяет проводить работы ультразвуковым томографом (это не предусмотрено техническими характеристиками прибора).

В таблице 3.2 приведены оптимальные параметры регистрации на примере ультразвукового томографа A1040 MIRA. Необходимо отметить, что рекомендуемая скорость поперечных волн (2550 м/с) определена опытным путем и может отличаться для разных участков. При выполнении работ рекомендуется определять скорость в 10 точках исследуемого интервала крепи и вычислять среднее значение.

Анализ и обработка данных выполняется в программном комплексе «IdealViewer» входящим в комплект поставки томографа A1040MIRA.

Программа обеспечивает считывание данных из прибора и представление их как в виде томограмм, так и в трехмерном объемном виде, что облегчает понимание конфигурации внутренней структуры бетонной крепи. Для каждого отражателя (границы «бетон-соль», полость, неоднородность) можно определить координаты его залегания в бетонной крепи.

Таблица 3.2

Рекомендуемые параметры регистрации

№ п/п	Параметр	Оптимальное значение
1	Аналоговое усиление	37 дБ
2	Число периодов ЗИ	1.0
3	Пауза между ЗИ	выкл.
4	Рабочая частота	40 кГц
5	Скорость	2550 м/с
6	Задержка	20 мкс
7	Качество изображения	«Высокое»
8	Глубина карты	1000 мм
9	Горизонтальный шаг	200 мм
10	Вертикальный шаг	100 мм
11	Горизонтальный размер карты	выкл.
12	Вертикальный размер карты	выкл.

Программное обеспечение максимально автоматизировано, и не требует глубокого знания принципов обработки данных акустического зондирования. Из операций, доступных пользователю программы, можно выделить следующие: выбор нужного скана (среза) в любой из трех координатных плоскостей, срез объемного вида в любой из плоскостей, выбор угла обзора и необходимой цветовой палетки, позволяющих максимально четко оценить внутреннее строение изучаемой крепи.

4. ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВКМС

На сегодняшний день метод георадиолокации успешно применяется для решения широкого круга задач, как при инженерных изысканиях, так и при обследовании различных строительных конструкций. Мобильность, сравнительная компактность аппаратуры и возможность проводить неразрушающий мониторинг среды с высокой детальностью делают его уникальным среди других геофизических методов. Также существуют примеры использования георадиолокации на калийных месторождениях по всему миру [41, 42, 3]. Известно, что для получения надежных результатов при использовании георадара необходимо учитывать два основных момента: первый – характеристики прибора, второй – электрические параметры изучаемой среды. И если характеристики прибора достаточно точно определены, то параметры изучаемой среды могут изменяться в очень широких пределах. Именно отсутствие параметрических данных (скорость и предельная глубина распространения электромагнитных волн) является причиной недостаточной эффективности метода георадиолокации при решении практических задач на ВКМС [21]. Уточнение этих параметров позволит определить круг приоритетных задач, решение которых возможно по средствам георадиолокации в условиях рудников ВКМС.

С целью определение скорости и максимальной глубинности электромагнитных волн в солях принято решение о проведении опытных работ в действующем калийном руднике. Опытные работы проведены по пластам КС, КрII, АБ, $В_с$ в шахте рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». При проведении работ применялись два подхода к получению результатов: георадиолокационное просвечивание и георадиолокационное профилирование. При профилировании приемник и источник ЭМ волн находятся на одной поверхности, в случае просвечивания источник и приемник располагались по разным сторонам исследуемого участка среды.

4.1. Методика проведения полевых работ

В общем случае, георадиолокационное обследование может проводиться по трем основным методикам: профилирование, просвечивание, зондирование. Для решения поставленных задач применялись только первые две методики.

При выполнении работ по методике *профилировании* намечается профиль, по которому затем проходит оператор с георадаром, у которого антенна приемника и излучателя находятся на заданном постоянном расстоянии друг от друга. С заданным шагом (т.е. интервалом времени) георадар генерирует электромагнитный импульс и регистрирует отклик среды – функцию амплитуды отраженного сигнала от времени запаздывания отраженного импульса.

Работы по методике профилирования были проведены для солей в условиях естественного залегания. Для работ использовался радар SIR-3000 фирмы GSSI и набор антенных блоков 100, 200, 400 МГц. Измерение пройденного расстояния производилось с помощью нитяного одометра. Исследования проводились по стенкам целиков переменной мощности. Принципиальная схема работа показана на рисунке 4.1. Мощность целиков изменялась от первых десятков сантиметров до первых десятков метров.

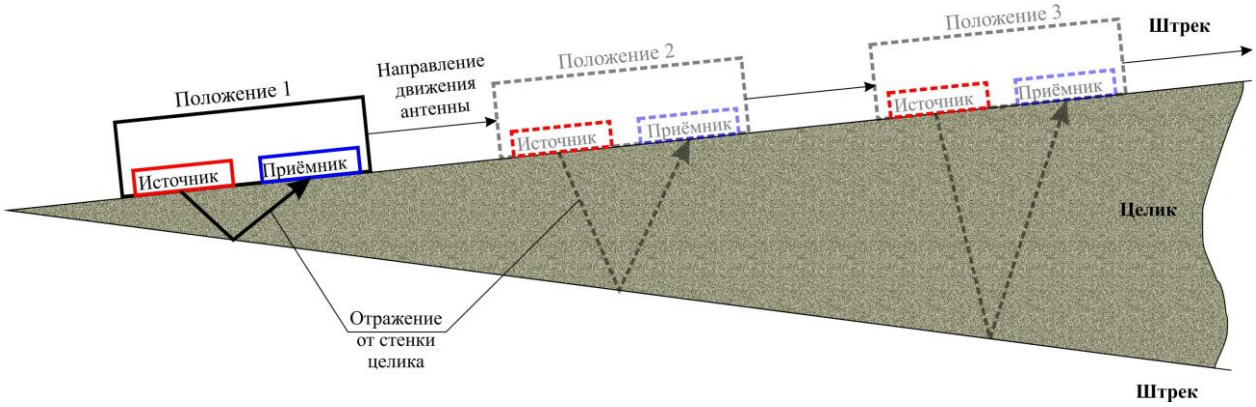


Рис. 4.1. Принципиальная схема работ по методике профилирования в шахтных условиях, вид сверху [15]

По результатам георадарного профилирования скорость распространения электромагнитных волн можно оценить двумя способами – на основе анализа

годографов дифрагированных волн, и с использованием информации о времени прихода отражения и мощности целика. Применительно к данной работе, дифрагированных волн практически не отмечается, поэтому скорости определялись на основе информации о времени прихода волны и мощности целика.

Под максимальной глубиной исследований понимается расстояние распространения электромагнитной волны на котором отклик пришедший от противоположной стенки целика уверенно различим на радарограммах. Для случаев, когда мощность целика оказывалась меньше возможностей аппаратуры, глубинность оценивалась по затуханию амплитуды зондирующего импульса.

При георадарном *просвечивании* необходим доступ к объекту изучения как минимум с двух сторон. При этом аппаратура так же должна давать возможность «разнести» источник и приемник на значительное, до нескольких десятков метров, расстояние. При просвечивании источник размещается с одной стороны изучаемого объекта, а приемник – с другой. Например, источник размещается в одном шахтном штреке, а приемник – в другом. Принципиальная схема работ показана на рисунке 4.2. Такая методика, дает возможность максимально точно определить скорость распространения электромагнитной волны в изучаемой среде.

Для выполнения работ использован георадар SIR-3000 производства фирмы GSSI с антенным блоком 100 МГц, так как конструкция блока позволяет разносить источник и приемник на некоторое расстояние. Работы выполнены на целиках по пластам КС, АБ, Кр II, B_c в руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий».

Визуализация данных выполнялась в программном комплексе RadExplorer. После загрузки файла данных, по радарограмме определяется время прихода прямой волны (первого вступления). Скорость волн определяется по формуле:

$$V=r/(t-\Delta t)$$, где

V- скорость волн среде, r – расстояния от источника до приемника, t – время прихода волны, Δt – задержка запуска (определятся как время прихода волны от источника к приемнику при расстоянии между блоками 0).

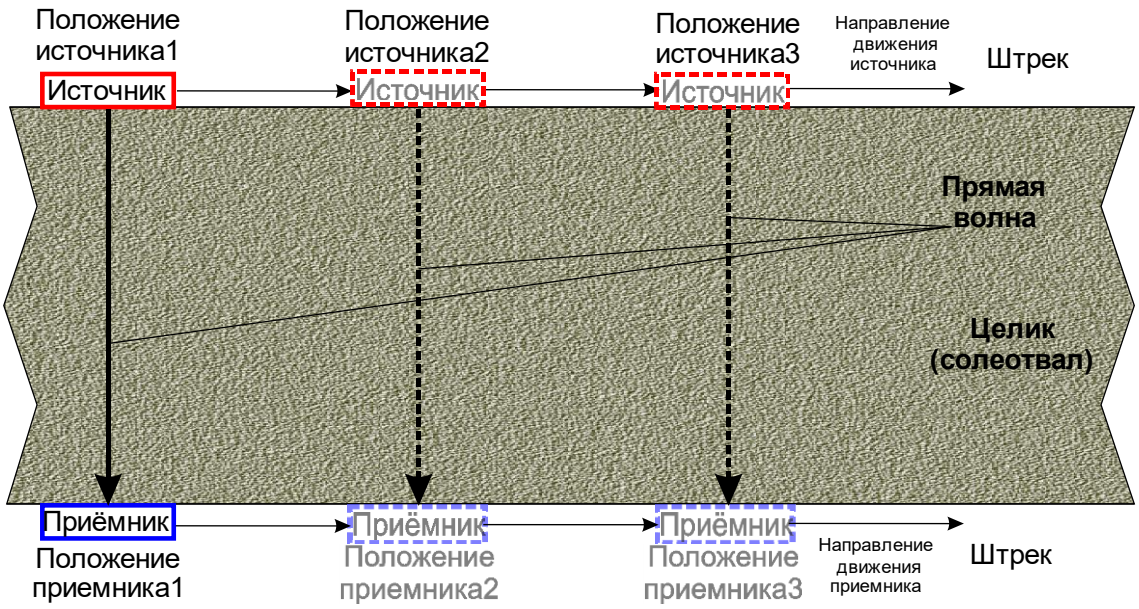


Рис. 4.2. Принципиальная схема работ по методике просвечивания в шахтных условиях, вид сверху

4.2. Опытные работы по определению скорости распространения электромагнитных в солях

Опытные работы направленные на определение скорости распространения электромагнитных волн проведены коллективом под руководством автора в 2016 году в руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» [53]. Для выполнения полевых работ использован георадар SIR-3000 и антенные блоки 100, 200, 400 МГц. При проведении работ использовались две основных методики рассмотренные выше: методика профилирования и методика просвечивания. Так как состав солей, а как следствие и их физические свойства отличаются, работы проводились по всем основным пластам на которых ведутся горные работы: КС, КР II, АБ, $В_с$.

Профилирование.

Работы проводились по стенке межкамерного целика переменной мощности экранированным антенным блоком на постоянной базе источник-приемник. Мощность целика на исследуемых участках изменялась от 0 (профиль начинался в начале целика) до первых десятков метров. Работы по методике профилирования были выполнены по пластам КС, КрII, АБ, Вс. Схема фактического расположения профилей по пласту КС представлена на рисунке 4.3.

Пример результатов обработки материалов, полученных антенным блоком 200 МГц, показан на рисунке 4.4, аналогичные материалы получены антенной 400 МГц, но с несколько меньшей глубиной. Данные, полученные антенным блоком 100 МГц, оказались низкого качества, поэтому в анализе не использовались. На материалах, полученных антеннами 400 и 200 МГц, четко прослеживается отражение от противоположной стенки целика. Известно, что по результатам георадиолокации скорость распространения электромагнитных волн можно оценить двумя способами – на основе анализа годографов дифрагированных волн и с использованием информации о времени прихода отражения и мощности целика. Так как в солях дифрагированных волн практически не отмечается, скорости определены на основе информации о времени прихода волны и мощности целика (рис. 4.5). Было установлено, что скорость распространения волн зависит от мощности целика. А именно, по данным, полученным с использованием антенны 200 МГц, скорость электромагнитных волн сначала падает с 9 до 7 см/нс, а затем, начиная с глубины 1 м, плавно увеличивается до 10 см/нс на глубине 4 м, после чего практически не меняется. По данным, полученным с использованием антенны 400 МГц, скорость в начальной части записи составляет порядка 4 см/нс и к глубине 5 м плавно увеличивается до 10 см/нс.

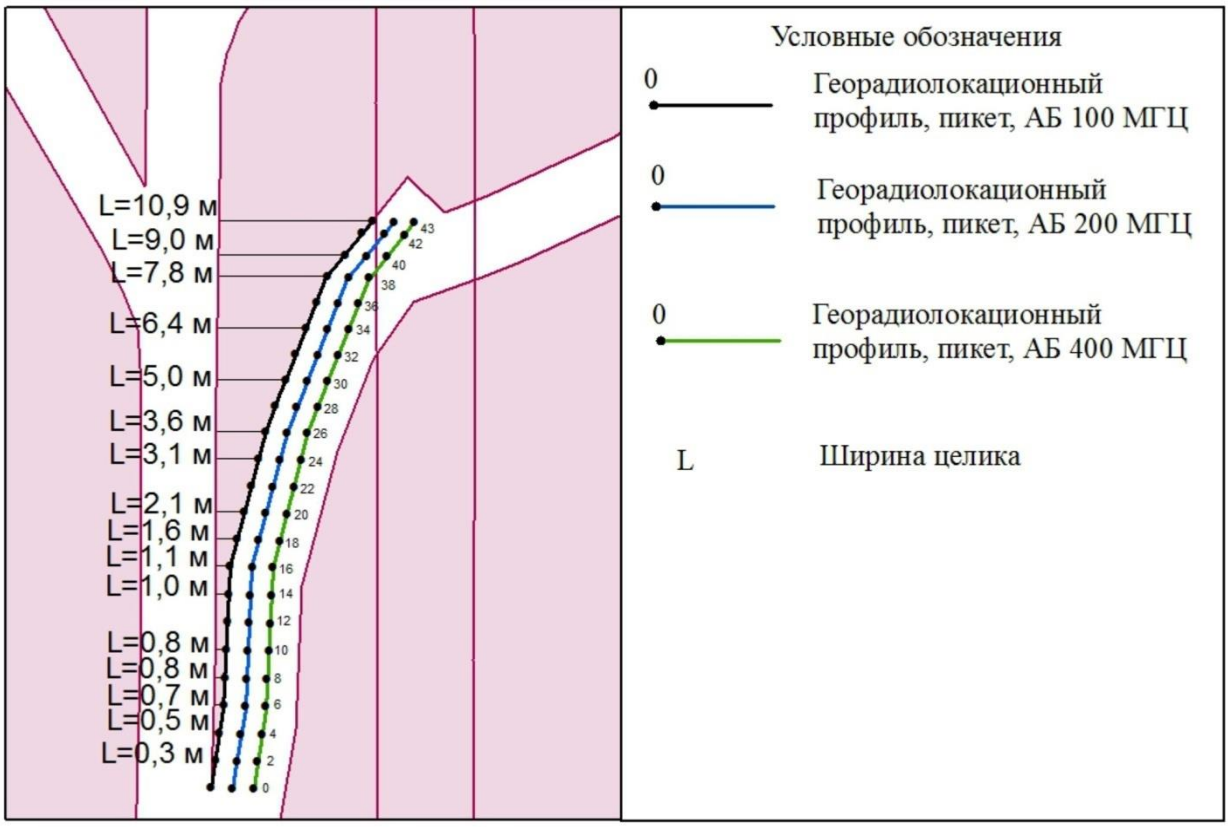


Рис. 4.3. Схема фактического материала по методике профилирования, пласт КС [15]

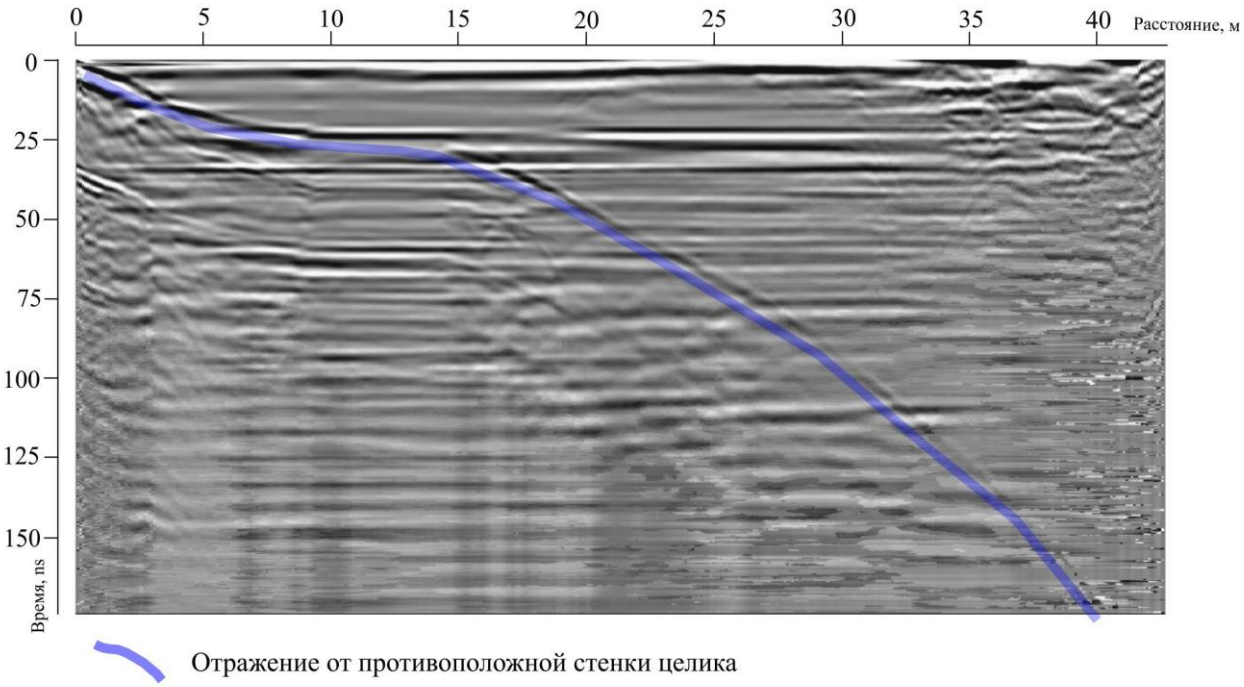


Рис. 4.4. Радарограмма, полученная по методике профилирования, антенна 200 МГц. Пласт КС [15]

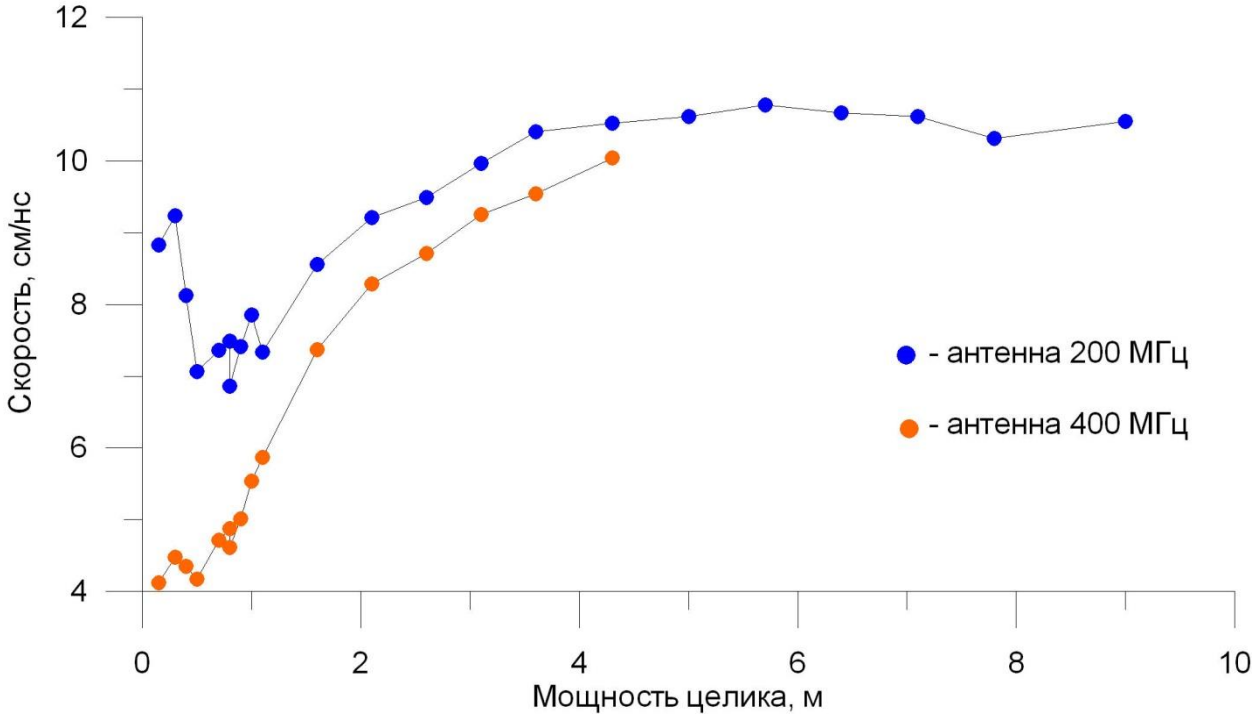


Рис. 4.5. Графики зависимости скорости распространения электромагнитных волн от глубины. Пласт КС [15]

Работы по пласту Кр II также были выполнены вдоль стенки целика переменной мощности. Мощность целика достигала 20 м. Графики изменения скорости электромагнитных волн представлены на рисунке 4.6. Зависимости скорости от глубины для трех разных антенн на пласте Кр II гораздо ближе друг к другу, чем для пласта КС. Глубже трех метров графики зависимости практически повторяют друг друга, отличаясь не более чем на 10%. Основные различия отмечаются до глубины 3 м, где разброс значений составляет от 7.5 до 12 см/нс для разных антенн. В среднем скорости для пласта Кр II составляет от 11 до 12 см/нс, что на 0,5-1 см/нс больше, чем для пласта КС.

Мощность целика по пласту АБ изменялась от 0 до 14,4 м. Исследования проведены по трем профилям с антеннами 100, 200 и 400 МГц. В результате обработки получены содержательные материалы, позволившие оценить скорость электромагнитных волн в пласте. Зависимости скорости от глубины для трех разных антенн на пласте АБ очень близки друг к другу (рис. 4.7). Графики зависимостей практически повторяют друг друга, отличаясь не более чем на 10%. В начальной части, до глубины 2 м, скорость увеличивается с 12.3 до 14.1 см/нс, после чего плавно уменьшается вплоть до максимальной глубины

исследования – до 14 м, до значений порядка 12 см/нс. В среднем скорость для пласта АБ составляет 12.5 см/нс.

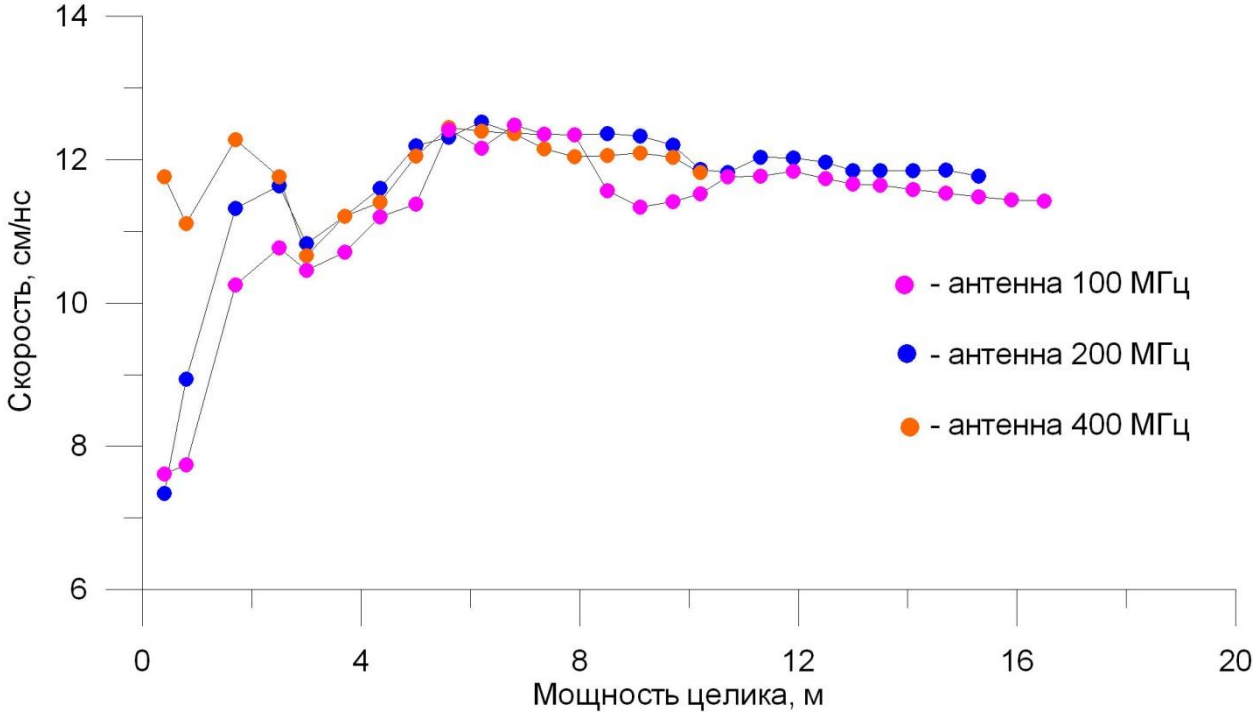


Рис. 4.6. Графики зависимости скорости распространения электромагнитных волн от глубины. Пласт Кр II [15]

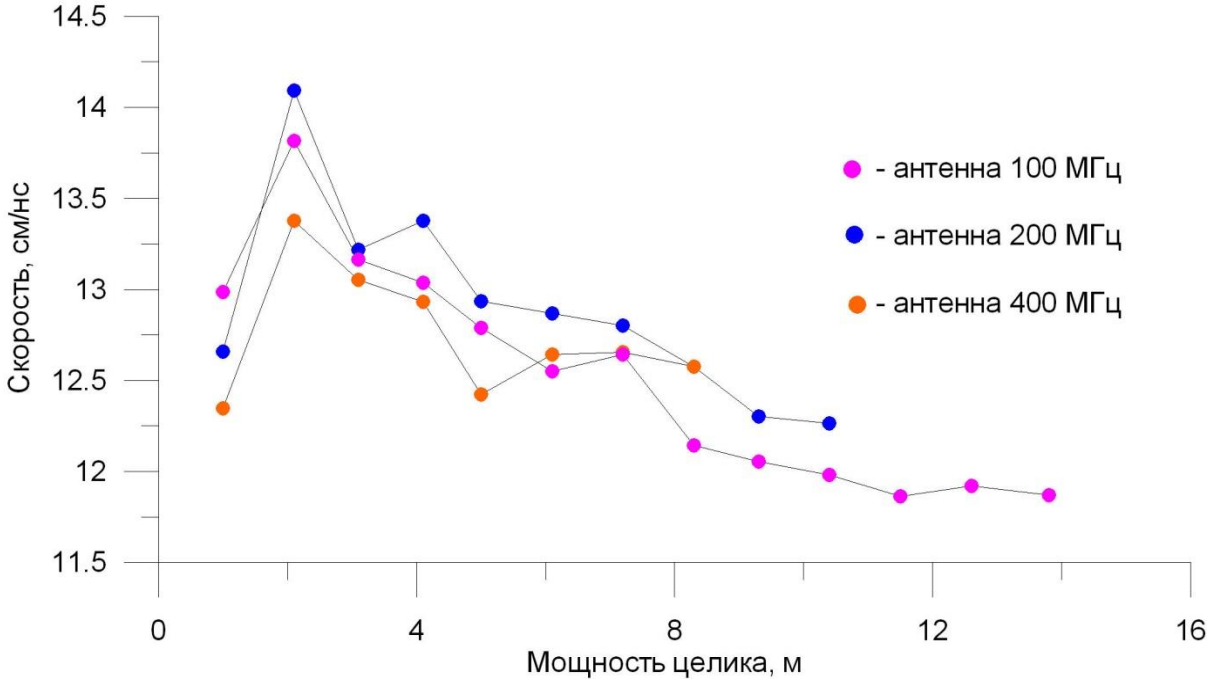


Рис. 4.7. Графики зависимости скорости распространения электромагнитных волн от глубины. Пласт АБ [15]

Для проведения работ по пласту Вс был выбран межкамерный целик, мощность которого изменялась от 0 до 7 м. Зависимости скорости от глубины для пласта Вс, начиная с глубины 3 м и глубже, для всех антенн очень близки и различаются менее, чем на 10% (рис. 4.8). До глубины 3 м зависимость для антенны 100 МГц значительно отличается от зависимостей для антенн 200 и 400 МГц. А именно, значения скоростей, определенные для антенны 100 МГц, начинаются с 16 см/нс на глубине 1 м и плавно снижаются до 13.7 см/нс. Скорости же, определенные для антенн 200 и 400 МГц, начинаются с 14 см/нс на глубине 1 м, и снижаются так же, как и для антенны 100 МГц до 13.7 см/нс. Далее, начиная с глубины 3 м, значения скоростей для всех трех антенн плавно снижаются до 12 см/нс.

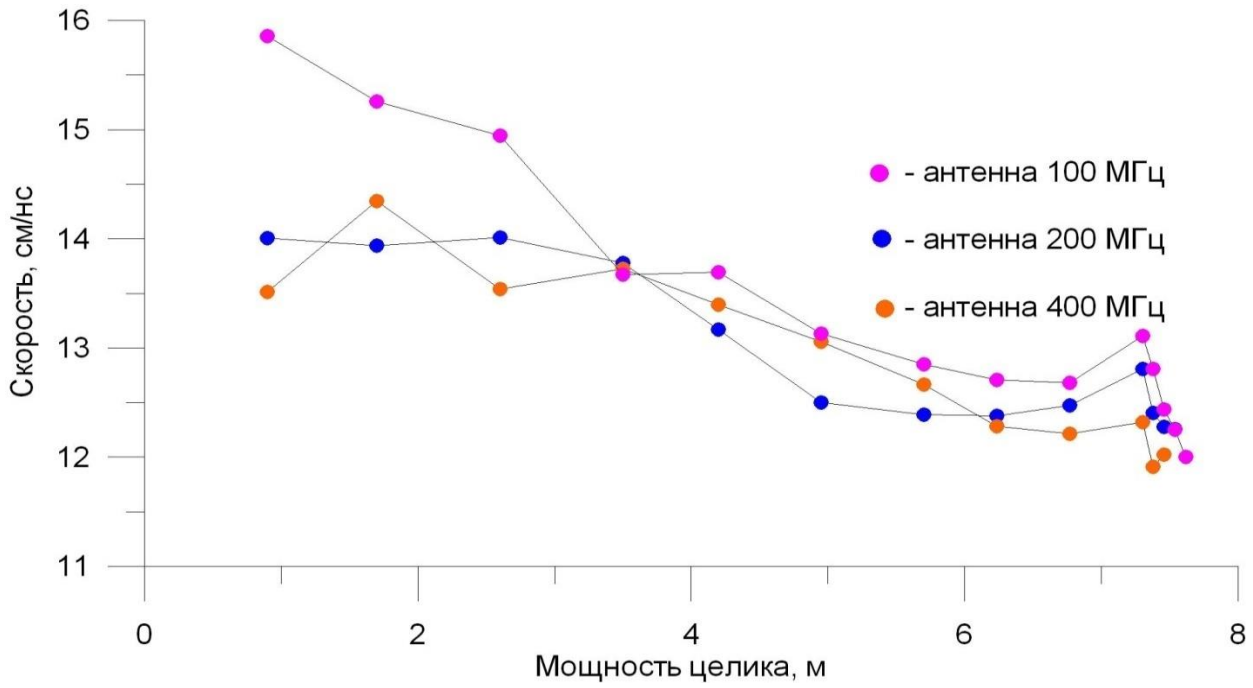


Рис. 4.8. Графики зависимости скорости распространения электромагнитных волн от глубины. Пласт Вс

Комплексный анализ материалов, полученных по разным пластам с использованием методики профилирования, позволил получить обобщенные результаты.

На рисунке 4.9 представлен сводный график зависимости скорости распространения электромагнитных волн в солях от глубины. До глубины 4 м разброс скоростей для всех антенн значительный – от 4 до 16 см/нс на глубине 1 м, до 10-14 см/нс на глубине 4 м. Глубже 4 м оценки скоростей расходятся тем меньше, чем больше глубина исследований.

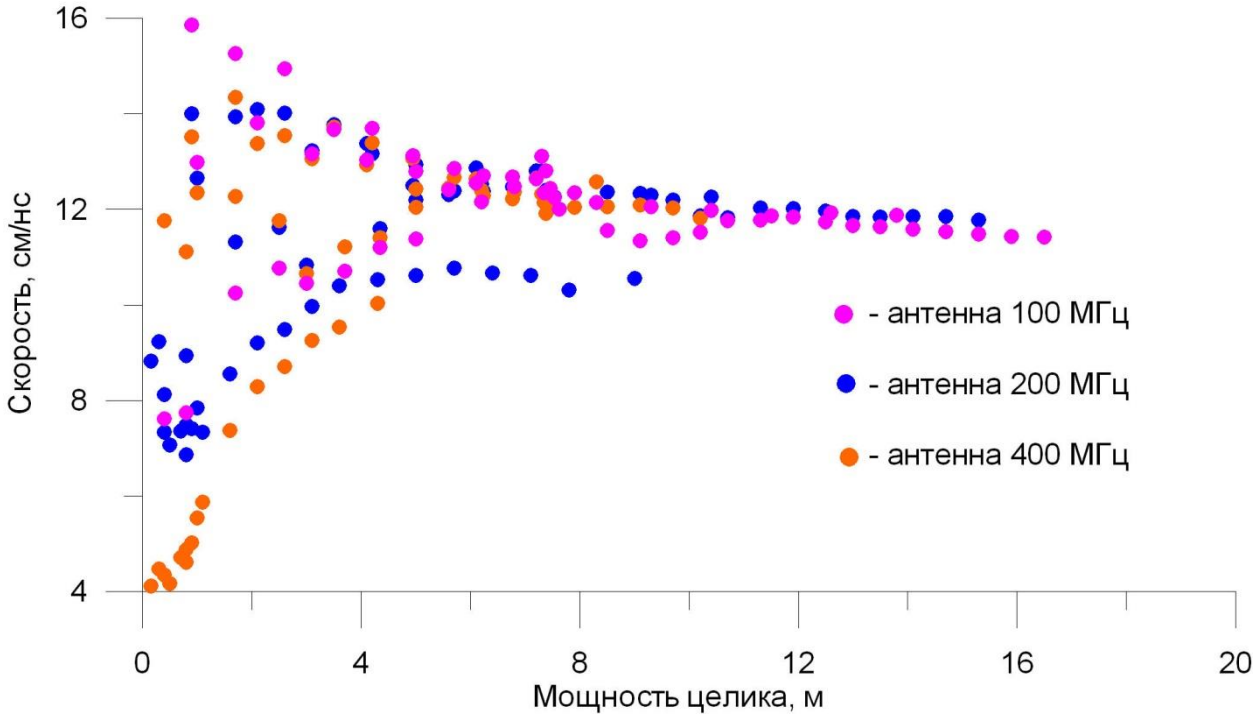


Рис. 4.9. Сводный график зависимости скоростей электромагнитных волн от глубины для четырех исследованных пластов [15]

Просвечивание.

Данный вид работ выполнен в качестве дополнительного. Для выполнения работ использован антенный блок георадара SIR-3000 с центральной частотой 100 МГц, так как конструкция блока позволяет разносить источник и приемник на расстояние до 30 м. Работы, как и в первом случае, выполнены в шахте рудника СКРУ-3, на целиках по пластам КС, АБ, Кр II, Вс. Для проведения работ выбирался целик на интересуемом пласте, приемный и передающий антенные блоки располагались по разные стороны целика на допустимых разносах антенных блоков. В частности, при работах на пласте

Кр II был выбран участок на 9-м блоке, 10-й панели, целик между камерами 99–101. Измерения были выполнены в трех точках. Схема фактического материала представлена на рисунке 4.10.

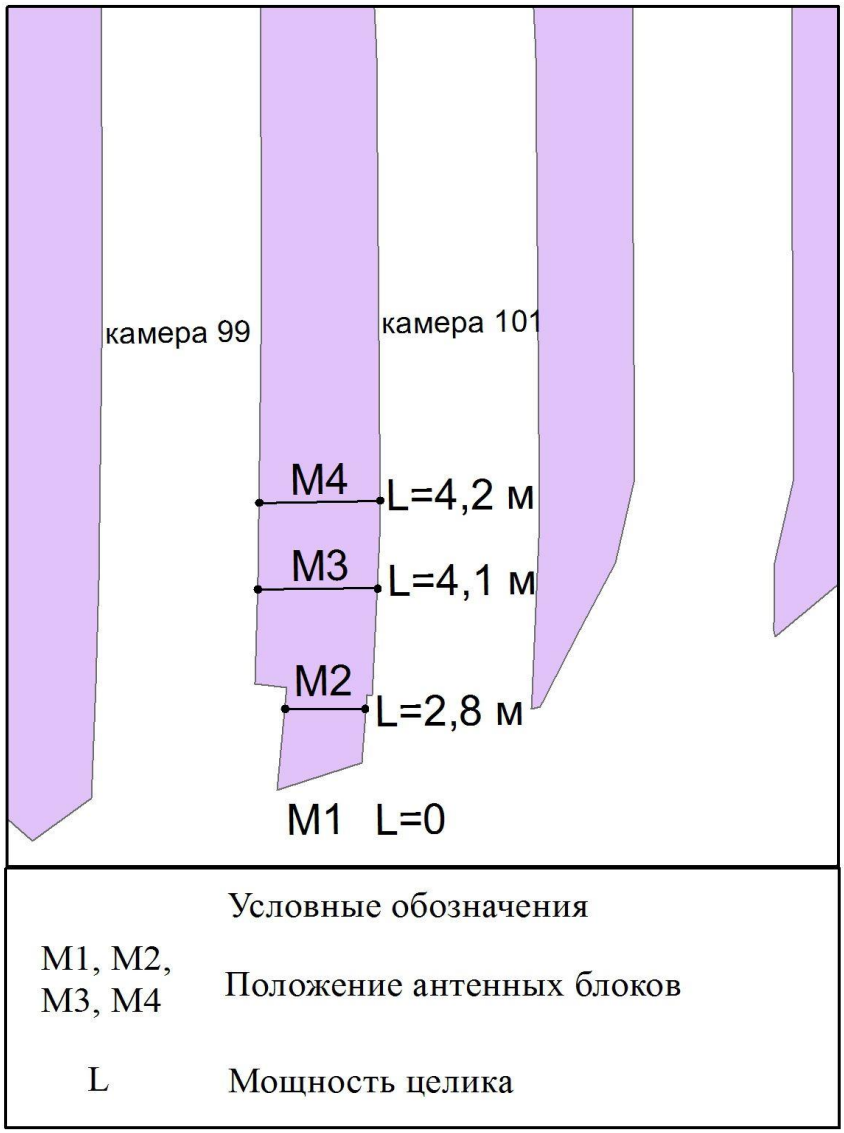


Рис. 4.10. Схема фактического материала по результатам работ по методике *просвечивания.* Пласт Кр II [15]

В результате обработки получена радарограмма, представленная на рисунке 4.11. Для удобства представления результатов в процессе обработки выполнена процедура «смещения нуля времени», за нуль принята позиция, при которой расстояние между антенными блоками было равно нулю (приемный и передающий прижаты друг к другу).

На радарограмме видно, что по мере удаления приемного и передающего блоков друг от друга, время прихода прямой волны увеличивается. Мощность целика также увеличивалась последовательно и составляла 210 см, 410 см и 420 см, время прихода прямой волны определенное по радарограмме, составило 25,9, 35,3 и 36 нс соответственно.

Таким образом, скорость волн в массиве будет составлять 10,8 см/нс в точке М2, 11,6 см/нс в точке М3, 11,6 см/нс в точке М4.

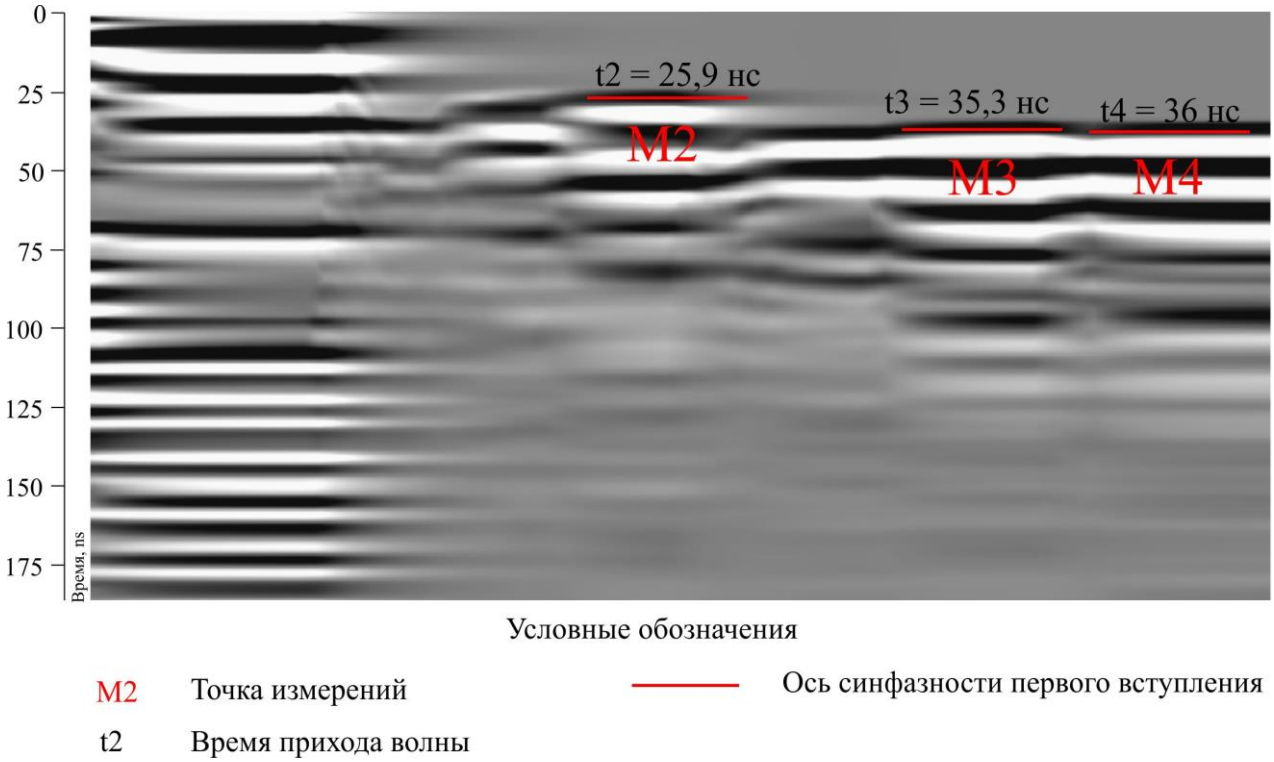


Рис. 4.11. Радарограмма, полученная по результатам просвечивания на пласте Кр II [15]

Аналогичным образом проведены работы и определены скорости распространения электромагнитных волн по пластам КС, АБ, Вс. Значения скоростей изменяются в диапазоне от 7,4 до 14,8 см/нс.

Применение двух взаимодополняющих подходов позволило определить скорость распространения электромагнитных волн для солей в условиях естественного залегания. При этом данные, полученные по двум методикам (профилирования и просвечивания), достаточно уверенно согласуются друг с другом. Обобщение полученных результатов позволило определить средние

значения скоростей распространения электромагнитных волн для различных отрабатываемых на ВКМС пластов. Обобщенные результаты определения скоростей распространения электромагнитных волн в солях ВКМС представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Скорость распространения электромагнитных волн в соляных породах

Центральная частота антенны	Скорость в пласте КС, см/нс	Скорость в пласте КР II, см/нс	Скорость в пласте АВ, см/нс	Скорость в пласте Вс, см/нс	Средняя скорость, см/нс
100 МГц	9,6	11.5	12	13	11.7
200 МГц	10.5	11.5	12,5	12.5	
400 МГц	10	11.5	12.7	13	

4.3. Опытные работы по определению эффективной глубины проникновения электромагнитных в солях

Опытные работы, направленные на определение эффективной глубины распространения электромагнитных волн проведены коллективом под руководством автора в 2016 году в руднике СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» [53]. Для выполнения полевых работ использован георадар SIR-3000 с комплектом антенных блоков 100, 200, 400 МГц. Работы выполнены по методике профилирования на постоянной базе источник-приемник по стенкам межкамерных целиков. Мощность целиков на исследуемых участках изменялась от 0 (профиль начинался в начале целика) до первых десятков метров. Пример схемы фактического расположения профилей на пласте Кр II представлен на рисунке 4.12.

В качестве примера определения глубины по результатам профилирования на рисунке 4.13 приведен геоэлектрический разрез, на котором отчетливо видна точка исчезновения отражения от противоположной стенки целика.

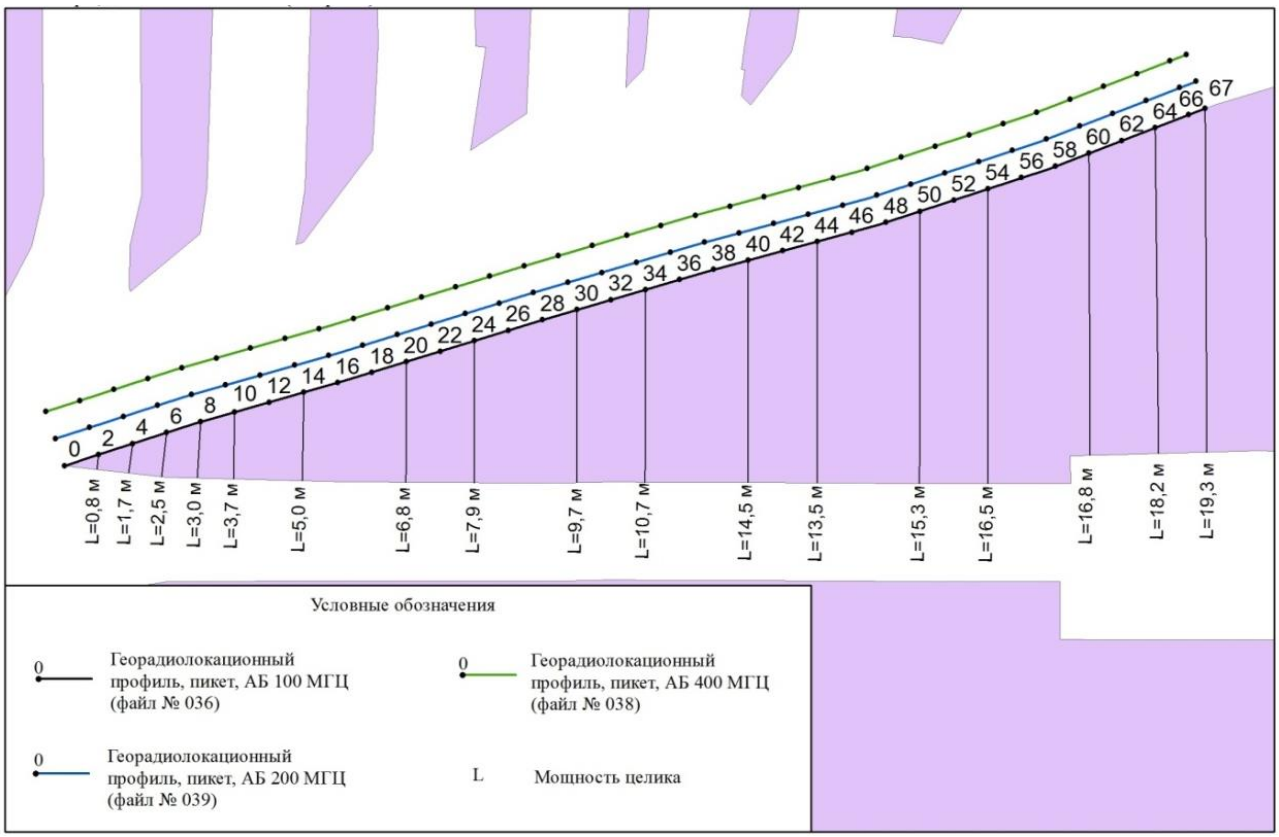
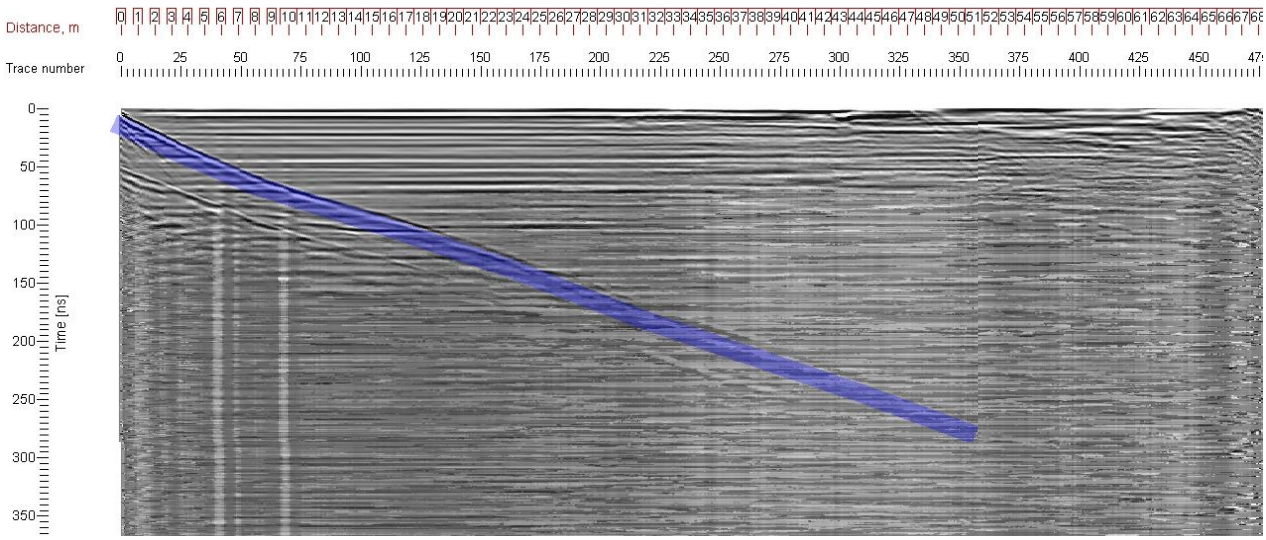


Рис. 4.12. Схема фактического материала. Пласт КрII



- отражение от противоположной стенки целика

Рис. 4.13. Геоэлектрический разрез по методике профилирования, антенна 200 МГц. Пласт Кр II

Поскольку мощность целика оценена с высокой точностью с помощью маркшейдерских наблюдений, глубина отражения в каждой точке профилирования известна, а так же легко определяется и максимальная глубина проникновения электромагнитных волн.

На некоторых целиках длина записи, установленная при проведении полевых работ, оказалась недостаточной, чтобы определить максимальную глубину, поэтому был выполнен регрессионный анализ амплитуды отражений как функции мощности целика (Рис. 4.14). Кроме того, результаты данного регрессионного анализа имеют самостоятельную ценность, поскольку позволяют предсказать максимальную эффективную глубину проникновения электромагнитных волн в солях при выполнении производственных работ без выполнения опытных исследований.

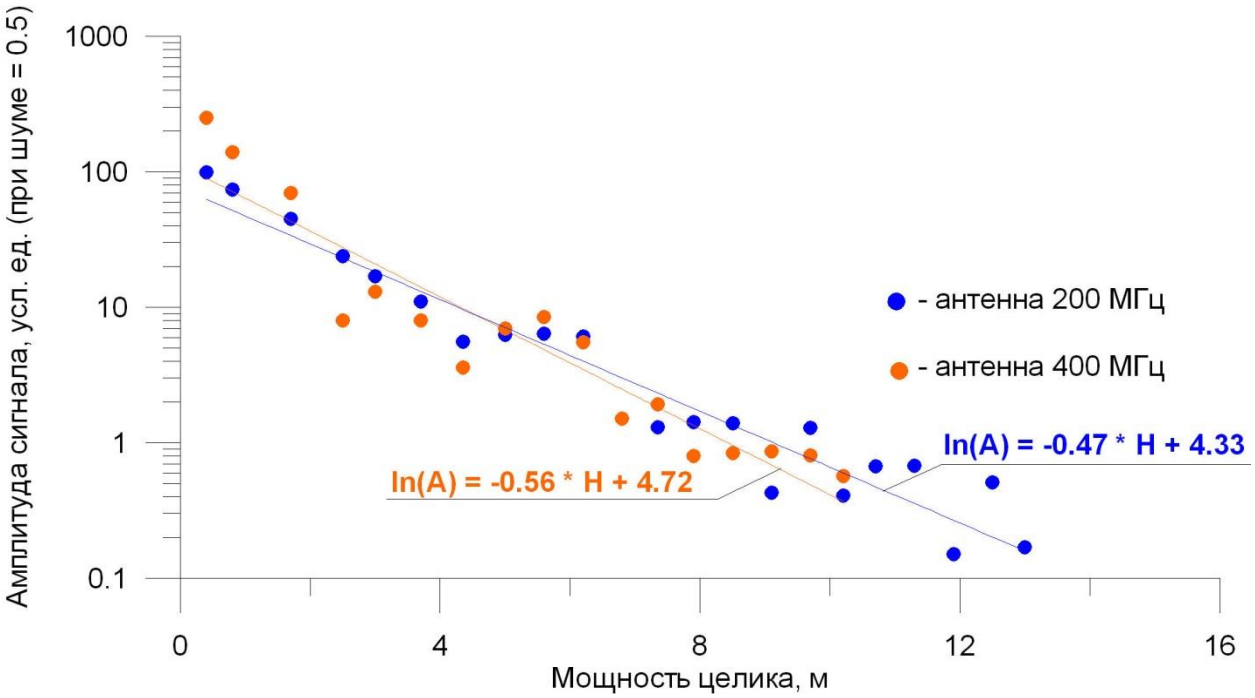


Рис. 4.14. Графики зависимости амплитуды электромагнитных волн от глубины. Пласт КрII

Аналогичные результаты были получены и по другим пластам. Комплексный анализ результатов, полученных по разным пластам, позволил получить обобщенные результаты и закономерности. На рисунке 4.15

представлен сводный график зависимости амплитуд от глубины. Зависимости для антенн 200 и 400 МГц очень схожи. Зависимость для антенны 100 МГц значительно отличается от первых двух. Основное отличие - затухание для антенны 100 МГц слабее, чем для антенн 200 и 400 МГц. Так же можно отметить общее превышение амплитуд антенны 100 МГц над амплитудами антенн 200 и 400 МГц. Причины этого превышения, вероятнее всего, заключаются в особенностях конструкции георадара SIR-3000 и антенных блоков.

Коэффициенты корреляции для кривых регрессии составляют 0.79, 0.88 и 0.80 для антенн 100, 200 и 400 МГц соответственно. Это высокие значения, что говорит о надежности результатов и правильном выборе уравнения регрессии.

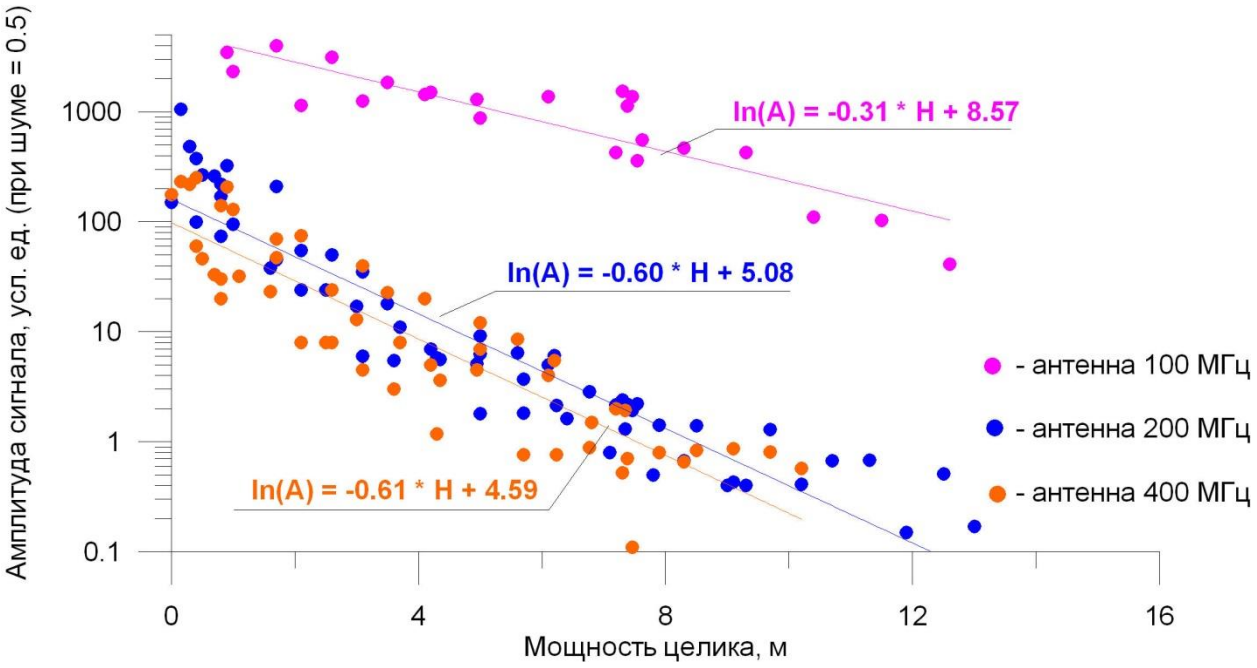


Рис. 4.15. Графики зависимости амплитуды электромагнитных волн от глубины. Сводные данные для четырех пластов

В таблице 4.2 представлены результаты определения максимальной эффективной глубины распространения электромагнитных волн в солях. В указанной таблице приведены как результаты по отдельным пластам, так и

осредненные значения. Результаты исследований по соляным породам в условиях естественного залегания, указывают на перспективность применения георадиолокации. Глубина распространения электромагнитных волн для антенного блока 100 МГц составляет 14 м, для антенного блока 200 МГц – 10,5 м, для антенного блока 400 МГц – 7,9 м. Кроме этого глубинность отличается так же и по пластам, при этом наибольшей глубиной характеризуется пласт КрII, а наименьшей - пласт КС.

Таблица 4.2

Результаты определения эффективной глубины распространения электромагнитных волн в солях

Центральная частота антенного блока	КС	КРII	АВ	Вс	Среднее
100 МГц	-	16	14	12	14
200 МГц	9	13	10	9	10.5
400 МГц	5.5	10	8.5	7.5	7.9

Необходимо отметить, что работы по определению скорости и эффективной глубины распространения электромагнитных волн в солях ВКМС были проведены вдоль напластования, по этой причине, с целью дополнительного подтверждения надежности определенных параметров, автором принято решение о проведении дополнительных работ поперек напластования, которые описаны в следующем разделе.

4.4. Опытные работы по определению местоположения выработки

Выполненные эксперименты по определению скорости и глубинности распространения электромагнитных волн показали, принципиальную применимость георадара для изучения особенностей строения и свойств горного массива. С целью заверки определенных ранее параметров выполнены работы по определению положения выработки с вышележащего горизонта.

Для проведения работ, на руднике СКРУ-3 был выбран участок, на котором выработка по пласту АБ короче расположенной выше выработки по пласту Вс. Работы проводились в почву по пласту Вс. Т.е. целевым объектом являлась нижележащая выработка. Принципиальная схема участка исследований показана на рисунке 4.16.

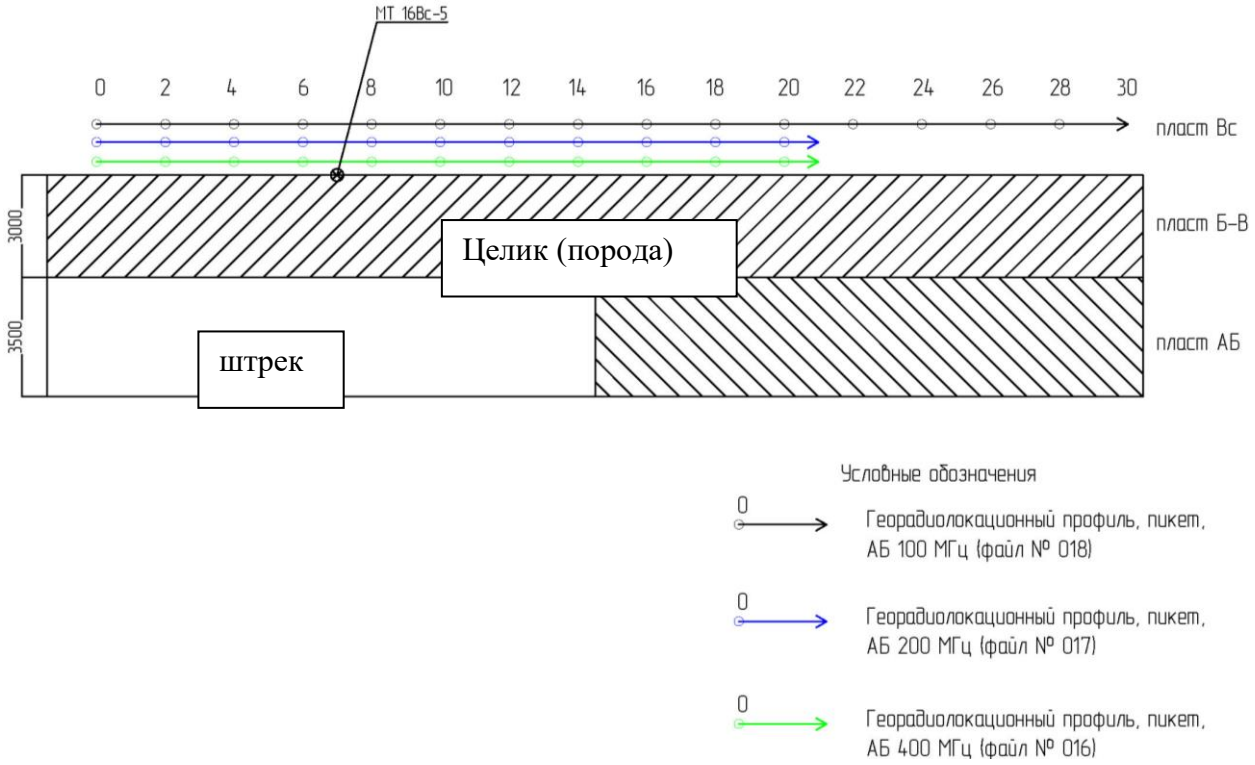


Рис. 4.16. Схема работ методом профилирования при исследовании в почву выработки, панель 17, блок 16, пласт Вс

Для проведения работ использован георадар SIR-3000 с антенными блоками 100, 200, 400 МГц. Анализ радарограмм позволяет заключить, что все три антенных блока позволяют выявлять нижерасположенную выработку. Однако, наилучший результат, по причине более высокой разрешающей способности, отмечается при применении антенного блока 400 МГц (рис. 4.17), кроме этого данная антенна позволяет уверенно выделить еще две отражающие границы: первая по мнению автора может быть связана границей штыба, вторая связана с глинисто-ангидритовым пропластоком (слой глины).

Для пересчета временного разреза в глубинный использована скорость 12,8 см/нс, определенная по данным ранее проведённых исследований, что

позволило увязать результаты георадиолокации с реальным положением естественных геологических и техногенных границ. Расположение границы именно на уровне 3 метров является еще одним подтверждением правильность определенных ранее параметров среды.

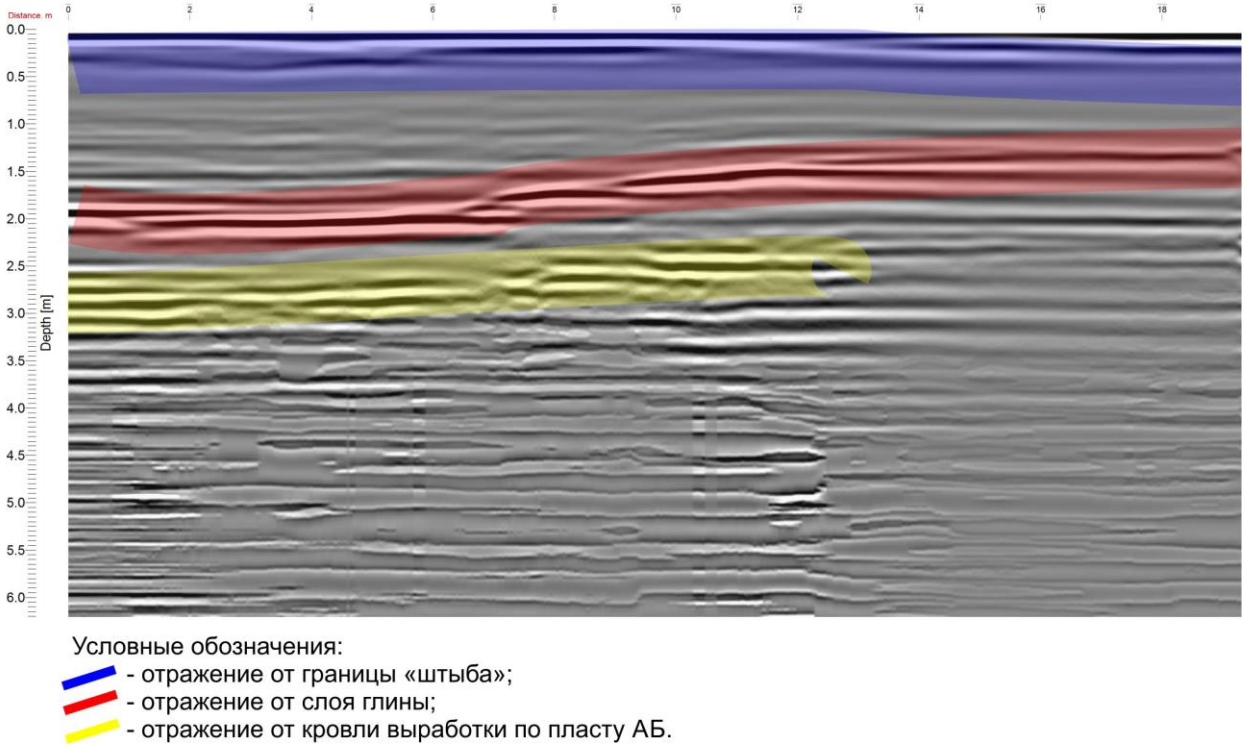


Рис. 4.17. Радарограмма, полученная антенным блоком 400 МГц

4.5. Оценка применимости георадиолокации в условиях ВКМС

Результаты исследований по соляным породам в условиях естественного залегания указывают на перспективность применения метода георадиолокации. Эффективная глубина распространения электромагнитных волн для антенного блока 100 МГц составила 14 м, для антенного блока 200 МГц – 10,5 м, для антенного блока 400 МГц – 7,9 м. Кроме этого глубинность исследований аналогично отличается и по пластам, при этом наибольшей глубиной характеризуется пласт Кр II, а наименьшей – пласт КС (см. выше таблица 4.2).

Средняя скорость распространения электромагнитных волн, определенная в результате экспериментов, находится в диапазоне 9,6–13 см/нс (см. выше таблица 4.1). При этом, данные полученные по методикам

профилирования и просвечивания достаточно уверенно повторяют друг друга. Различия в скорости для разных антенных блоков незначительны и являются следствием погрешности измерений мощности целиков и оценки времени первых вступлений.

Дополнительным подтверждением эффективности использования георадара для решения производственных задач явились опытные работы по уточнению местоположения горной выработки с вышележащего горизонта рассмотренные в предыдущем разделе, которые показали, что георадар позволяет не только определять местоположение выработки, но и уточнять строение междупластья, например, определять положение глинисто-ангидритовых пропластков.

Таким образом, применение георадиолокации в шахте возможно и перспективно. Основным направлением является уточнение геологического строения массива, а так же мониторинг процессов его изменения в результате горных работ. При проведении георадиолокационных исследований в качестве опорных могут быть использованы полученные в данной работе значения скоростей и предельных глубин проникновения электромагнитных волн. Для получения максимально объективной информации для конкретного участка рекомендуется использовать дополнительные источники информации, в том числе годографы дифрагированных волн и глубину залегания известных геологических границ.

Отдельно необходимо отметить одну интересную особенность, выражающуюся в зависимости скорости распространения электромагнитных волн от мощности целика. По мнению автора, различие скоростей распространения электромагнитных волн может быть связано с изменением физических свойств приконтурной части целика. Т.е. чем старше целик, тем большая его часть подвержена деформациям и тем меньше скорость распространения электромагнитных волн. Так, например, минимальным изменением скорости относительно мощности характеризуются пласты АБ и В, отработанные в 2015–2016 гг., тогда как максимальным изменением

характеризуется пласт КС, отработка которого была выполнена в 2011 году. Пласт Кр II имеет промежуточные значения, его отработка выполнена в 2014 году. Кроме этого, абсолютные значения скорости так же возрастают по мере уменьшения возраста целика (см. выше таблица 4.1). Полученные результаты указывают на принципиальную возможность установления корреляционной связи между скоростью распространения электромагнитных волн и мощностью зоны междукамерного целика, подверженной деформациям, что в свою очередь позволит разработать технологию оперативного контроля фактической несущей способности междукамерных целиков.

Проведенные исследования являются важной стадией внедрения георадиолокации в производственную деятельность калийных компаний Верхнекамья. По мнению автора, георадиолокация позволит оперативно получать достоверную информацию об особенностях строения массива, что при своевременном использовании приведет не только к повышению уровня промышленной безопасности при ведении горных работ, но и положительно скажется на защите рудников от затопления.

5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА ВКМС

Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод, что применение георадиолокации в шахте возможно и перспективно. Совещания проведенные с представителями геологических, маркшейдерских и геофизических служб ПАО «Уралкалий», а так же примеры работ на рудниках Канады, Германии и Франции [32, 33, 34, 39, 46, 49], позволили определить четыре наиболее перспективные и актуальные задачи, решение которых возможно по средствам георадиолокации.

5.1. Возможность раннего обнаружение областей заколообразования в кровле горных выработок

На рудниках ПАО «Уралкалий», крепление горных выработок осуществляется в соответствии с паспортами проходки, которые разрабатываются для каждого отрабатываемого участка месторождения. Однако такой подход имеет один существенный недостаток, он не может учитывать локальных неоднородностей строения массива, а так же особенностей его отработки, все это приводит к образованию заколов. Важность недопущения подобных событий понимают руководители компании. Так одно из 7 кардинальных правил по охране труда [37] заключается в полном запрете на проведение работ в выработках в которых имеются отслоения (заколы) в кровле. Таким образом целью реализации предлагаемого подхода является повышение безопасности горных работ.

Применение георадиолокации с целью выявления трещин и областей возможного заколообразования является неотъемлемой частью горных работ на рудниках Германии и Канады [32, 33]. В этих странах для проведения подобных исследований используют специализированные автомобили, на которых установлен подъемный механизм для антенного блока (рис. 5.1),

позволяющий доставлять блок непосредственно к кровле. Такой подход значительно повышает производительность полевых наблюдений. Установлено, что по средством применения георадиолокации возможно выявления трещин, раскрытие которых составляет первые миллиметры [32, 57, 56, 50].

Рис. 5.1. Антенный блок георадара на механическом подъемном устройстве установленном на автомобиль [42]

Несмотря на то что рассмотренный подход уже реализован на калийных предприятиях, для уточнения оптимальных условий регистрации в условиях ВКМС потребуется проведение предварительных опытных работ. Существенными факторами могут оказаться расстояние от антенного блока до поверхности наблюдений (так как прижим антенного блока к кровле может быть затруднителен, в отличие от работ в почву), частота зондирующего импульса, размеры трещин, которые можно выделять по данным георадиолокации и др. Так, например, опытные работы, проведенные на модели бетонной крепи в 2015 году, указывают на сильную зашумленность

материалов, получаемых в случае, когда антенный блок оторван от поверхности на 2–3 см [55].

С целью разработки технологии обследования кровли горных выработок методом георадиолокации на предмет наличия зон трещиноватости рекомендуется проведение опытных исследований. В рамках таких исследований должны быть в первую очередь рассмотрены вопросы необходимой разрешающей способности, выбора оптимальных параметров регистрации, а также проведены опытные работы в действующих рудниках по всем интересующим пластам. Результаты интерпретации должны быть заверены бурением с отбором образцов для уточнения физического состояния массива.

5.2. Оценка динамики изменения физико-механических свойств целиков и междупластий

К настоящему времени контроль междукамерных целиков ведется на основе выборочного отбора пород для определения физико-механических свойств соляных пород с дельнейшим расчетным определением соответствия действующей нагрузки ее допустимому уровню. Однако, как показывает практика, выборочная экспериментальная оценка не исключает возможности пропуска зон существенного отличия (как в большую, так и меньшую сторону) физико-механических свойств соляных пород, от установленных на основе отбора образцов.

Контроль состояния несущих элементов системы разработки ведется преимущественно визуальным способом по состоянию конструктивных элементов системы разработки – оценке наличия зон нарушенного состояния и качественного режима деформирования, а также по данным линий грунтовых реперов, заложенных на земной поверхности.

Оба способа определяют значительный объем недостатков, поскольку при визуальном осмотре невозможно выполнить количественную оценку, а по

данным линии грунтовых реперов - качественную оценку. При этом даже при комбинированном применении оба способа затруднительно использовать для количественного прогноза.

В свою очередь, применение инструментальных методов контроля напряженно-деформированного состояния также существенно ограничено - указанный метод требует локального заложения датчиков, что в условиях рудников ПАО «Уралкалий» требует заложения огромной сети датчиков для получения представительных результатов.

В этой связи, наиболее рациональным является периодическое применение методов неразрушающего контроля породного массива. Еще в 2002 году Ковин О.Н. высказал предположение о возможности использования кинематических параметров электромагнитных волн для определения характеристик межкамерных целиков [19]. Недавние исследования продемонстрировали увеличения скоростей и затухания георадарного импульса вызываемое трещинообразованием в бетоне. Вероятнее всего этот эффект связан с увеличением заполненного воздухом пространства в материале, а также рассеиванием георадарного импульса в трещиноватой среде [46, 37]. Результаты проведенных автором исследований так же показали, что скорости распространения электромагнитных волн изменяются в зависимости от возраста целика и его мощности. Однако в отличии от бетонных конструкций области трещиноватости в целиках вызывают снижение скорости распространения электромагнитных волн. По мнению автора, снижение скорости распространения электромагнитных волн может быть связано с изменением свойств приконтурной части целика. Т.е. чем старше целик, тем большая его часть подвержена деформациям и тем меньше скорость распространения электромагнитных волн. Так, например, минимальным изменением скорости относительно мощности характеризуются пласты АБ и В, отработанные в 2015–2016 гг., тогда как максимальным изменением характеризуется пласт КС, отработка которого была выполнена в 2011 году. Пласт Кр II имеет промежуточные значения, его отработка выполнена в 2014

году. Кроме этого, абсолютные значения скорости также возрастают по мере уменьшения возраста целика (см. выше таблица 3.3 и рис. 3.33).

Вероятной причиной является изменение физического состояния приконтурной части целиков с момента их оконтуривания. При этом с увеличением «возраста» целика происходит более масштабное изменение его физических свойств. Такой результат возникает в связи с активной ползучестью соляных пород - под действием постоянной нагрузки происходит разрушение приконтурной части целика, сопровождающиеся снижением несущей способности соляных пород. С течением времени формируется зона повышенной трещиноватости в междукамерных целиках, изменяющая геоэлектрические характеристики целиков приводящие к снижению скорости распространения электромагнитных волн.

Полученные результаты показывают принципиальную возможность установления корреляционной связи между скоростью распространения электромагнитных волн и зоной междукамерного целика, неподверженной пластическим деформациям. Такие результаты позволят разработать технологию оперативного контроля фактической несущей способности междукамерных целиков.

Контроль состояния междупластий, так же очень важен и должен рассматриваться в комплексе с контролем целиков, так как эти элементы системы отработки находятся в тесной взаимосвязи. Так например разрушение междупластья изменит распределение нагрузок в целиках, за счет чего последний так же могут достаточно быстро разрушиться. Опытные работы показали, что георадар способен определять трещины. Кроме этого, так как междупластье состоит из нескольких слое, существует потенциальная возможность контроля положения данных слое друг относительно друга.

Для разработки указанной технологии необходимо проведение дополнительных исследований, включающих в себя мониторинговые наблюдения на целиках и междупластьях по различным пластам, на которых ведутся горные работы. Параллельно с геофизическими исследованиями

должны выполняться инструментальные геомеханические наблюдения, а так же изучение свойств массива и условий его нагружения.

5.3. Контроль параметров в процессе проходки горных выработок

Проведенные исследования показывают, что на данных георадиолокации достаточно уверенно отражаются геологические границы, в частности глинисто-ангидритовые прослои («коржи»), расположенные в основании междупластий. Как известно, в зависимости от различных факторов паспорт проходки горных выработок может предусматривать отбор одного «коржа», отбор всех «коржей» с заходом в вышележащий пласт не более нормативного значения, сохранение защитной пачки и т. д. Отклонение от нормативов влечет за собой увеличение времени проходки (необходимость дополнительного крепления кровли), разубоживания полезного ископаемого и, как следствие, снижения качества руды выдаваемой на фабрику. Все перечисленные факторы влекут за собой увеличение себестоимости конечного продукта.

Подобные системы нашли применение в Канаде [40], где одним из наиболее важных условий безопасности является сохранение пачки соли мощность не менее 0,5–1 м до глины. И нарушение данного правила может привести к обрушению кровли горной выработки. Такое обрушение имело место в феврале 2013 года и привело к повреждению комбайнового комплекса. Пример установки георадара на комбайн показан на рисунке 5.2.

Для рудников верхнекамского месторождения, применение георадиолокации в процессе проходки выработок может рассматривается только с позиции корректировки параметров проходки с целью соблюдения паспорта проходки. Это позволит повысить качество руды поступающей на фабрику, уменьшит затраты связанные с разубоживанием и увеличит скорость проходки. Кроме того, корректное выполнение требований паспортов проходки положительно повлияет на общую безопасность рудников и защиту их от затопления.

С целью практической реализации предлагаемого проекта потребуется проведения широкого комплекса опытных работ и с обязательным участием не только специалистов горно-геологических служб компании недропользователя, но и сотрудников завода изготовителя комбайновых комплексов для согласования конструктивных изменений горной машины.

Рис. 5.2. Пример установки георадара на комбайн [40]

5.4. Оценка полноты закладки горных выработок

Согласно технологическому регламенту на закладочные работы, в настоящее время в условиях ВКМС применяются два способа ведения закладочных работ – механический и гидравлический [34].

При механическом способе закладочный материал доставляется в рабочую зону конвейерным или самоходным транспортом, а в рабочие камеры – самоходным транспортом (вагоны, погрузочно-доставочные машины и т.д.). При гидравлическом способе закладочный материал доставляется в рабочую зону и камеры с помощью трубопроводов. Практика ведения закладочных работ показала, что при значительных объемах закладочных работ с использованием солеотходов в качестве закладочного материала более эффективен гидравлический способ закладки, так как он более производителен, позволяет закладывать выработки с большей степенью заполнения и имеет меньшую усадку закладочного массива. Механический способ эффективен при небольших объемах закладки, например при закладке каменной соли от проходки полевых выработок или камер служебного назначения.

Контроль за технологическими параметрами осуществляется посредством установки контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации. Автоматизированный контроль осуществляют с использованием специализированного программного обеспечения. Управление осуществляют по программе диспетчеризации гидрозакладочного комплекса. Общую массу закладываемых солеотходов контролируют по конвейерным весам, установленным на трактах подачи солеотходов, либо при их отсутствии пересчитывают с показаний расходомера, установленного на пульпопроводе. Это позволяет определять объем поступивших солеотходов и как следствие степень заполнения камер.

Однако такие технологии контроля закладочного процесса начали применять не более 15 лет тому назад. По этой причине актуальной остается задача по оценке степени заполнения для определения адекватных мер охраны ранее подработанынх объектов. Ранее было показано, что георадиолокация

позволяет уверенно картировать кровлю выработки на нижележащем пласте, как следствие есть потенциальная возможность определение и уровня закладочного массива в нижележащей камере. Для разработки технологии проведения работ, а так же определения ограничений и разрешающей способности потребуется проведение дополнительных опытных работ на конкретных участках шахтных полей, где такие задачи могут быть актуальны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над кандидатской диссертацией автором выполнена адаптация технологии работ методами георадиолокации и ультразвуковой томографии к условиям вертикальных стволов калийных шахт, а также выполнена оценка возможности применения метода георадиолокации для решения горно-геологических задач на рудниках Верхнекамского месторождения.

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Обоснована и построена физическая модель сегмента бетонной крепи, соответствующая реальным условиям. Выполнены опытные работы методами электроразведки, сейсморазведки, акустики, ультразвуковой томографии и георадиолокации позволившие оценить применимость указанных методов для диагностики состояния закрепного пространства и бетонной крепи шахтных стволов. Результаты проведенных работ показали, что для задачи обследований бетонной крепи и закрепного пространства более информативными оказались два геофизических метода: георадиолокация и ультразвуковая томография. Кроме этого, автором выполнена оценка основных факторов, оказывающих негативное влияние на результаты полевых наблюдений, даны рекомендации по их минимизации и определены оптимальные параметры регистрации при выполнении полевых работ.

2. Проведенные исследования позволили разработать технологию диагностики состояния бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов, основанную на двух взаимодополняющих методах: георадиолокации и ультразвуковой томографии. Получен патент №2624799 «Способ комплексной диагностики состояния бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов» [28].

3. Выполнены опытные работы направленные на оценку применимости георадиолокации на рудниках ВКМС. Проведена оценка

скорости и максимальной эффективной глубины распространения электромагнитных волн в различных типах солей, отрабатываемых на Верхнекамском месторождении. Полученные экспериментальные данные позволили оценить круг производственных задач, характерных для рудников ВКМС, которые возможно решать методом георадиолокации. По мнению автора, внедрение георадиолокации в производственную деятельность калийных рудников позволит не только повысить уровень промышленной безопасности при ведении горных работ, но и повысит надежность защиты рудников от затопления.

4. Важнейшим результатом выполненной в диссертации работы, является применение предложенных технологий в производственной деятельности:

- в 2016 году были выполнены работы по обследованию зумпфовой части ствола рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». В результате проведения работ были выявлены полости за бетонной крепью, а также участки значительного увеличения/уменьшения мощности бетонной крепи. Все выявленные аномалии в последствии были заверены бурением, найденные полости ликвидированы;
- в 2017 году на рудниках ПАО «Уралкалий» начаты опытно-промышленные испытания технологии, позволяющей выполнять оценку полноты закладки камер методом георадиолокации. Первые опытные работы показали, что георадиолокация позволяет уверенно определять полноту закладки пласта Кр II, при выполнении работ из выработок пласта АБ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

СКРУ	- Соликамское калийное рудоуправление
БКПРУ	- Березниковское калийно-производственное рудоуправление
ВЗТ	- водозащитная толща
ГИ УрО РАН	- Горный институт Уральского отделения Российской Академии Наук
ВКМС	- Верхнекамское месторождение солей
МНК	- методы неразрушающего контроля
ОГТ	- общая глубинная точка
АРА	- автоматическая регулировка амплитуд
ПКС	- покровная каменнная соль
ПдКС	- подстилающая каменная соль

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барях, А.А. Деформирование соляных пород / А.А.Барях, С.А.Константинова, В.А.Асанов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 180 с.

2. Булычев, Н.С. Крепь вертикальных стволов шахт / Н.С.Булычев, Х.И.Абрамсон. – М.: Недра, 1978. - 301 с.

3. Вагин, В. Б. Состояние и перспективы развития геофизических исследований в подземных выработках Старобинского месторождения калийных солей / В.Б.Вагин // Горный журнал. – 2012. – № 8. – С. 45-48.

4. Васильев, Ю.Ю. Использование геофизических методов для определения глубины погружения свай / Ю.Ю.Васильев, Н.М.Цыпченко Н.М. // Каротажник. – 2009. – № 11. – С. 72-80.

5. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М.Л.Владов, А.В.Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.

6. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.

7. Глебов, С.В. Обоснование рациональных комплексов геофизических методов исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд: дисс. … канд. техн. наук: 25.00.16. / Глебов Сергей Валерьевич. – Пермь, 2006. – 156 с.

8. Голубев Б.М. Особенности внутреннего строения соляной толщи Верхнекамского месторождения. Проблемы соленакопления, Т. 2. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 173

9. Джиноридзе, Н.М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н.М.Джиноридзе. – СПб-Соликамск: ОГУП Соликамск Типография, 2000. – 400 с.

10. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и рассыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. ПБ 03-553-03: Документы Федеральной Службы по экологическому, техническому и томному надзору. – М.: НТЦ Промышленная безопасность, 2009

11. Ермаков, А.П. Введение в сейсморазведку: учебное пособие / А.П.Ермаков.– Тверь: ГЕРС, 2012. – 160 с.

12. Жуков, А.А. Комплексная диагностика бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников / А.А.Жуков, А.М.Пригара, В.В.Тарасов, Р.И.Царев // Горный журнал. – 2014. – № 4. –С.81-87.

13. Жуков, А.А. Мониторинговый контроль физического состояния среды методами электрометрии на потенциально-опасных участках образования деформаций земной поверхности / А.А.Жуков, А.М.Пригара, И.Ю.Пушкарева, Р.И.Царев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №4. С.163-171.

14. Жуков, А.А. Опыт применения комплекса геофизических методов для выявления карстовых полостей в отвалах калийных рудников /А.А.Жуков, А.М.Пригара, И.Ю.Пушкарева, Р.И.Царев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №5. С.120-130.

15. Жуков, А.А. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения солей /А.А.Жуков, А.М.Пригара, И.Ю.Пушкарева, Р.И.Царев // Инженерные изыскания. – 2017. – № 3. С.28-33.

16. Жуков, А.А. Разработка и адаптация технологии диагностики бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников /А.А.Жуков // ГИАБ. – 2016. – № 8. С.245-254.

17. Кардинальные правила по охране труда ПАО «Уралкалий»: ООО «ПрессА», 2013.

18. Инструкция по геологическому обслуживанию лицензионных участков Верхнекамского месторождения солей ПАО «Уралкалий»: Березники, 2016.

19. Ковин, О.Н. Исследование деформаций соляных пород методом георадиолокационного зондирования / О.Н.Ковин // Сборник докладов. Материалы научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2001 году. – Пермь, 2002. – С.30-32.

20. Ковин, О.Н. Исследование открытых трещин в массиве соляных пород методов георадар / О.Н.Ковин // Моделирование стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы международной конференции и научной сессии ГИ УрО РАН. – Пермь, 2003. – С.197-199.

21. Ковин, О.Н. Особенности методики проведения измерений методом георадар в калийных рудниках ВКМКС / О.Н.Ковин // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. – Пермь, 2004. – С.95-98.

22. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И.Кудряшов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.

23. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И.Кудряшов. –2-е изд., перераб. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.

24. Манец, И.Г. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов / И.Г.Манец, Б.А.Грядущий, В.В.Левит. – Донецк.: «Світ книги», 2012. – 418.

25. Методические указания по проведению экспертных обследований шахтных подъемных установок. РД 03-422-01.

26. Ольховиков, Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных месторождений / Ю.П.Ольховиков. – М.: Недра, 1984. – 238 с.

27. Ольховиков, Ю.П. Проектирование и опыт эксплуатации шахтных стволов калийных рудников / Ю.П.Ольховиков // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 52-54

28. Способ комплексной диагностики бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов : пат. 2624799, Рос. Федерация, МПК G01V 1/00 / А.А.Жуков, А.М.Пригара, И.Ю.Пушкарева, В.В.Тарасов ; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИ Галургии» ; заявл: 2016119277, 18.05.2016 ; опубл.06.07.2017, бюл. №19.

29. Пупатенко, В.В. Определение местоположения подземных коммуникаций с помощью георадара «ЛОЗА»: метод. пособие по выполнению практических работ / В.В.Пупатенко, Г.М.Стоянович, Ю.А. Сухобок. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – С. 24.

30. Рекомендации по проведению георадиолокационных измерений для решения геологических задач / ООО «Логические системы», г. Раменское, 2008, 28.

31. Сейсмоакустический регистратор «IS16M». Технический паспорт. ООО НПП ИНТРОМАГ. Пермь. – 2012.

32. Старовойтов, А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие / А.В.Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2008. – С. 192.

33. Татаркин, А.В. Определение методами электрометрии характеристик фундаментов при реконструкции и строительстве зданий и сооружений / А.В.Татаркин, К.В.Голубев, А.А.Филимончиков // Инженерные изыскания в строительстве. – 2013. – №5. – С. 31-32

34. Технологический регламент на закладочные работы на рудниках ПАО "Уралкалий", Пермь-Березники. – 2016.

35. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: технологический регламент / С.-Пб. – 2004.

36. Annan, A.P. Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada / A.P.Annan, J.L.Davis, D.Gendzwill // Geophysics. – 1988. – № 12. – P. 1556-1564.

37. Annan, A.P. 2003. Ground Penetrating Radar, Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software, Inc., Mississauga, Canada.

38. Annan, A.P. GPR — History, Trends, and Future Developments Canada / A.P.Annan // Subsurface Sensing Technologies and Applications. – 2002. – № 3 (4). – P.253-270.

39. Dong, P. Applying Mise-a-la-masse Method to Determine the Length of Reinforcement in Bored In situ Concrete Piles / P.Dong, J.Fan, Z.Chen, L. Wang // JENVIRON ENG GEOPHYS, 2008. – № 2. – P. 51-56.

40. Funk, C. Application of ground penetrating radar in potash mines for improved ground fall hazard recognition / C.Funk, Z.Brewster, R.Brehm // CIM 2016 Convention, 2016.

41. Grégoire, C. GPR abilities for the detection and characterisation of open fractures in a salt mine / C.Grégoire, L.Halleux, V.Lukas // Near Surface Geophysics, 2003. — №3. – P. 139 – 147.

42. Kelly, C. Using Ground Penetrating Radar for In-Seam Crack Detection in Potash / C.Kelly, D.Gerhardt, D.Unrau // CSEG RECORDER, 2005 — № 09. – P. 183 – 194.

43. Kovin, O.N. Mapping of evaporite deformation in a potash mine using ground penetrating radar: Upper Kama deposit, Russia / O.N. Kovin // Journal of Applied Geophysics, 2011. – 74. – P.131-141.

44. Kovin, O.N. Fractures imaging in the Upper Kama potash mine using 3-D GPR data Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. Keystone, Colorado / O.N. Kovin // SAGEEP, 2010 .

45. Lane, J.W. Evaluation of groundpenetrating radar to detect free-phase hydrocarbons in fractured rocks — results of numerical modeling and physical experiments / J.W.Lane, M.L.Buursink, F.P.Haeni, R.G.Versteeg // Ground Water, 2000. – № 38. – P. 929–938.

46. Orlando, L. Modeling and testing of high frequency GPR data for evaluation of structural deformation / L.Orlando, A.Pezone, A.Colucci, // NDT&E International, 2010. – №43. – P.216–230.

ФОНДОВАЯ ЛИТЕРАТУРА

47. Акустический мониторинг состояния околоствольного пространства. Ствол № 3 БКПРУ: отчет о НИР / Санфиров И.А. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009.

48. Акустический мониторинг состояния околоствольного пространства стволов БКПРУ-4: отчет о НИР / Санфиров И.А. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2012.

49. Геофизическое заключение по результатам работ методом георадиолокации в стволе №2 рудника БКПРУ-1: отчет о НИР / Квиткин С.Ю. – Березники: ПАО Уралкалий, 2004.

50. Детальное обследование участков бетонной крепи выше яруса № 65 и ниже яруса № 73 ствола № 5 рудника СКРУ-2 ОАО Уралкалий. Выполнить предварительный прогноз дальнейшей безопасной эксплуатации ствола: отчет о НИР / Тарасов В.В. – Пермь: ОАО «Галургия», 2012.

51. Заключение о состоянии бетонной крепи зумпфовой части ствола № 5 рудника СКРУ-2 ОАО «Сильвинит»: отчет о НИР / Ярушин А.Д. – Пермь: ОАО «Галургия», 2009.

52. Методическое сопровождение акустического мониторинга состояния околоствольного пространства. Ствол №3 БКПРУ-4: отчет о НИР / Санфиров И.А. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009.

53. Оценка применимости георадиолокации в условиях ВКМС: отчет о НИР / Жуков А.А. – Пермь: ОАО «Галургия», 2015.

54. Разработка макета аппаратуры для акустического мониторинга состояния околоствольного пространства: отчет о НИР / Санфиров И.А. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009.

55. Разработка технологии диагностики бетонной крепи шахтных стволов методами неразрушающего контроля: отчет о НИР / Жуков А.А. – Пермь: ОАО «Галургия», 2015.

56. Рекомендации по обеспечению эксплуатационной устойчивости крепи шахтных стволов рудника БКПРУ-4 и рудника СКРУ-2: отчет о НИР / Ольховиков Ю.П. – Пермь: ОАО «Галургия», 2012.

57. Технико-экономическое обоснование разведочных кондиций и переоценка запасов Быгельско-Троицкого участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2006). Фирма «Агрохимбезопасность» ОАО «Агрохиминвест»: отчет о НИР / Петрик, А.И. – Березники: ОАО «Уралкалий», 2006.