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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: Спасский Борис Алексеевич

доктор геолого-минералогических наук, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры геофизики ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: Цирель Сергей Владимирович,

доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного

университета (г. Санкт-Петербург) Мельник Виталий Вячеславович

кандидат технических наук, заведующий

отделом геомеханики Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук

(г. Екатеринбург)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный

горный университет» (г. Екатеринбург)

Защита состоится 27 сентября 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.009.01 в Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича по адресу: 620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики УрО РАН им. Ю. П. Булашевича

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, ИГФ УрО РАН, учёному секретарю диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук, профессор



#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

Безопасность ведения горных работ на калийных рудниках была и остается актуальной задачей, требующей постоянного внимания горногеологических служб. Если теме разведки месторождений посвящено бесчисленное множество научных исследований и геофизике здесь отводится одна из ключевых ролей, то вопросы безопасной эксплуатации зачастую решаются без привлечения геофизических методов.

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 применения в условиях Верхнекамского месторождения солей (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. Однако для успешного решения практических задач в конкретных геологических условиях необходимо учитывать два основных момента: первый – характеристики оборудования, второй – электрические свойства изучаемой среды. И если характеристики оборудования достаточно точно определены, то параметры изучаемой среды могут изменяться в очень широких пределах. Определение этих параметров позволит оценить круг решение приоритетных задач, которых возможно посредством георадиолокации в условиях рудников ВКМС.

Второе перспективное направление для применения геофизических методов — это обследование бетонной крепи шахтных стволов. В силу легкой растворимости солей, вопросу состояния бетонной крепи шахтных стволов на калийных рудниках уделяется особое внимание. Крепь шахтного ствола должна на протяжении полного срока его службы не только сохранять свою несущую способность, но и обеспечивать защиту рудника от возможного прорыва подземных вод. Едиными правилами безопасности предусмотрен только 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 горногеологических задач на Верхнекамском месторождении солей.

### Основные задачи исследования

• обзор и анализ эффективности основных направлений геофизических исследований, применяемых на ВКМС. Обоснование перспективных направлений применения геофизики для решения горногеологических задач;

- создание модели сегмента бетонной крепи шахтного ствола с наличием дефектов характерных для крепи действующих стволов;
- проведение опытных работы по изучению строения модели бетонной крепи геофизическими методами, а также проведение работ в действующем стволе калийного рудника;
- на основе анализа полученных данных выбор рационального комплекса методов и разработка технологии диагностики бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников;
- уточнение скорости распространения электромагнитных волн в различных типах солей Верхнекамского месторождения;
- уточнение максимальной эффективной глубины проникновения электромагнитных волн разной частоты для солей Верхнекамского месторождения;
- на основе анализа полученных данных оценка перспективных направлений применения георадиолокации на рудниках ВКМС.

#### Зашишаемые 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 крепи шахтных стволов, 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 распространения и максимальная эффективная глубина проникновения электромагнитных волн различной частоты, характерные для солей Верхнекамского месторождения;

5. На основании результатов выполненных опытных работ доказана возможность применения георадиолокации для решения актуальных 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 указывают на принципиальную возможность установления корреляционной связи между скоростью распространения электромагнитных волн и шириной ненарушенной части междукамерного целика или мощностью 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. 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).

### Исходные материалы и личный вклад автора

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

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю профессору Б.А. Спасскому за ценные советы 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.

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. Шусткина 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.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Современное состояние проблемы

Первая глава диссертационной работы состоит из трех разделов, в ней рассмотрено современное состояние проблемы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения и применения геофизических методов на нем. В главе использованы результаты исследований А.И. Кудряшова, Б.М. Голубева, С.В. Глебова, А.И. Петрика, Н.М. Джиноридзе, Ю.П. Ольховикова, И.Г. Манец, В.А. Асанова, А.А. Баряха, И.А. Санфирова, В.В. Тарасова, А.Д. Ярушина, О.Н. Ковина и др. В первом разделе приведены общие сведения о геологическом строении Верхнекамского месторождения солей.

Во втором разделе приведены общие сведения о шахтных стволах ВКМС и рассмотрены основные проблемы, возникающие в процессе их эксплуатации. Так в конструкции шахтного ствола можно выделить 4 основные части. Верхняя и средняя части ствола имеют комбинированную крепь, которая достаточно устойчива к нагрузкам и обеспечивает необходимый уровень гидроизоляции. В нижней и зумпфовой частях ствола возводится монолитная бетонная крепь, представляющая из себя цилиндр толщиной порядка 500 мм. Под действием физических и химических факторов бетонная крепь может разрушаться. Анализ причин и видов нарушений бетонной крепи указывает на то, что подавляющая часть нарушений развивается из закрепного пространства, поэтому актуальным становится вопрос выполнения предупреждающей диагностики состояния крепи и закрепного пространства. Однако в настоящее время едиными правилами безопасности предусмотрена проверка только путем визуального осмотра. Изучение закрепного пространства эксплуатационными службами

горных предприятий осуществляется посредством бурения шпуров. Такой подход имеет два основных недостатка: во-первых, он нарушает целостность крепи, 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 в процессе 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».

Отдельные попытки использования геофизических методов для изучения бетонной крепи стволов выполнялись с 2004. Для работ применялась георадиолокация, акустика и сейсморазведка. Однако все работы выполнялись как экспериментальные, заверочного бурения выделенных аномалий не производилось, в связи с этим установить их эффективность не представлялось возможным. В 2014 году были выполнены первые полноценные исследования бетонной крепи ствола методом георадиолокации. Результаты показали, что метод в настоящее время не адаптирован для проведения исследований в условиях шахтных стволов, следствием чего является низкая скорость проведения работ и относительно низкая достоверность получаемых результатов.

Таким образом, необходимо провести оценку применимости современных геофизических методов для изучения бетонной крепи шахтных стволов, определить оптимальный комплекс методов и выполнить их адаптацию к условиям шахтных стволов.

Третий раздел посвящен описанию основных направлений и методов геофизических исследований, применяемых на рудниках ПАО «Уралкалий» в настоящее время. Для обеспечения безопасной эксплуатации в компании комплекс методов, включающий гравиметрические, электроразведочные и сейсморазведочные методы, применяемые в наземных, подземных и наземно-подземных вариантах. Основными задачами геофизики на ВКМС являются: выявление аномальных особенностей строения и состава ВЗТ, определение пространственного положения геофизических аномалий, оценка и контроль изменения состояния ВЗТ под воздействием горных работ. Обзор ранее выполненных работ показал, что на ВКМС не применяется метод георадиолокации, который, успешно используется для решения широкого круга задач на калийных рудниках по всему миру. На рудниках ВКМС, в начале 2000-х годов проводились опытные работы методом георадиолокации, однако в дальнейшем они были признаны малоинформативными. Рассмотрев результаты работ, автор связывает недостаточную эффективность метода с отсутствием параметрических данных для изучаемых пород ВКМС, что в свою очередь не позволило правильно оценить возможности метода для решения практических задач. Из практики известно, что для получения надежных результатов при использовании георадара необходимо учитывать

два основных момента, первый — характеристики оборудования, второй — параметры изучаемой среды. И если характеристики оборудования определены достаточно точно, то параметры изучаемой среды могут изменяться в очень широких, заранее неизвестных пределах.

Таким образом, для ответа на вопрос о применимости метода георадиолокации и последующей его адаптации для конкретных задач, необходимо определить два основных параметра: первый — скорость распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения, второй — максимальная эффективная глубина проникновения электромагнитных волн различной частоты.

Обоснованию первого защищаемого положения: «Физическая модель сегмента бетонной крепи, позволяющая выполнить оценку применимости геофизических методов для обследования крепи и закрепного пространства шахтных стволов» посвящена глава 2.

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, этот контраст будет обеспечиваться разницей физических свойств бетона, соляных пород и полостей с различным заполнителем (воздух, вода, рассол). Для оценки применимости геофизических методов, позволяющих изучать состояние крепи и закрепного пространства, была построена модель сегмента бетонной крепи. За основу модели была принята двухслойная среда, состоящая из соли и бетона. Мощность соляной толщи 10–40 см, бетонной 40–80 см. Также выполнена имитация неоднородностей в теле крепи и в закрепном пространстве, размеры модели 3,5×3×0,8 м (Д×Ш×В). Схема расположение неоднородностей и общий вид модели до заливки бетона показаны на рис. 1.

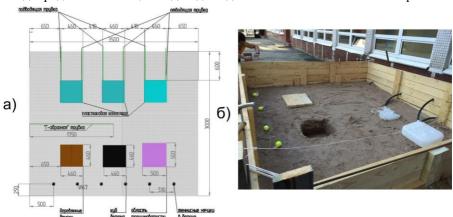


Рис. 1. Модель сегмента бетонной крепи: а) схематическое представление, вид сверху; б) внешний вид модели до заливки бетона

С целью объективного анализа, на модели были опробованы все наиболее распространенные геофизические технологии: электроразведка (гальванический, индуктивный и смешанный варианты, аппаратура АМС-1 и Эра-МАКС), сейсморазведка (на продольных и поперечных волнах, сейсмостанции ТЕЛСС-3 и IS-48), акустика (акустический локатор ЭХО-3М), ультразвуковая томография (томограф A1040MIRA) и георадиолокация (радар SIR-3000, антенны 400, 900 МГц).

Результаты опытных геофизических исследований показали, что для обследования бетонной крепи шахтных стволов наиболее подходящими являются два геофизических метода: георадиолокация и ультразвуковая томография.

Ультразвуковая томография. Работы проведены акустическим томографом A1040MIRA. Для наблюдений использованы четыре частоты 25, 40, 60, 85 кГц. При этом 25 и 85 кГц – соответственно нижняя и верхняя границы рабочих частот прибора. Наблюдения на частоте 85 кГц положительного результата не дали. При работе на частотах 25–60 кГц, результат удовлетворительный (рис. 2). 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 ниже границы «соль-бетон» сигнал не распространяется.

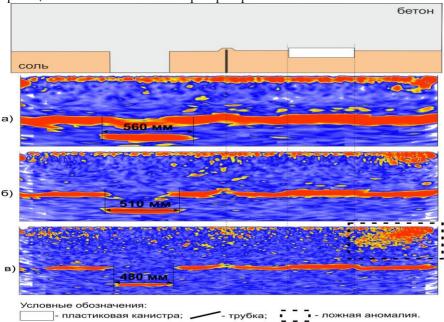


Рис. 2. Сравнение результатов ультразвуковой томографии при разных частотах: а)  $25\kappa\Gamma$ ц, б)  $40\kappa\Gamma$ ц, в) 60 к $\Gamma$ ц

Погрешность определения мощности бетона не превышает 5-15~% в зависимости от используемой частоты. Различия в данных при разных частотах заключаются только в детальности получаемых результатов. Чем выше частота, тем более точно можно определять размеры неоднородностей. Например, при частоте 25~к Гц образ локального увеличения мощности бетона различим только по второму донному сигналу (рис. 2, a), горизонтальный размер неоднородности, который можно определить по этому сигналу составит 580~мм. При частоте 40~к Гц (рис. 2, a) размер выявленной неоднородности оценивается в 510~мм. При частоте 60~к Гц (рис. 2, a) размер неоднородности 250~mm. Реальный размер 250~mm.

Несмотря на большую детальность получаемых результатов такая точность зачастую является избыточной. А высокая частота ( $60~\rm k\Gamma \mu$ ) может приводить к появлению ложных аномалий, которые связаны с неровностью поверхности наблюдений либо скоплением заполнителя. Пример такой «ложной аномалии» приведен на рис. 2,  $\epsilon$ .

Георадиолокация. Работы выполнены георадаром SIR-3000 с применением экранированных антенных блоков 400 и 900 МГц. На первом этапе определена скорость распространения электромагнитных волн в среде. Для этого на границу бетон-соль была помещена металлическая труба и выполнена съемка в крест ее расположения. Скорость, определенная путем наложения на ось синфазности теоретической гиперболы, максимально подходящей по параметрам, составила 8,0 см/нс. Определенное значение ниже тех, что обычно приводятся в справочниках 9–15 см/нс.

Работы на частоте 900 МГц положительного результата не дали. В совокупности с информацией о низких значениях скорости в бетоне можно предположить, что при заливке бетона происходит 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. В георадиолокации увеличение диэлектрической проницаемости 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.

При работе с антенной 400 МГц модель была покрыта продольными и поперечными профилями с шагом 30 см. В целом результат достаточно информативный, — граница «бетон соль», а также местоположение крупных «дефектов» фиксируются достаточно уверенно (рис. 3).

Кроме этого выполнены работы, направленные на оценку влияния заполнителя полости на результаты исследований. Наблюдения состояли из трех этапов. На первом этапе канистра была пустая, на втором её заполнили водой, на третьем заполнили рассолом с минерализацией около 200 г/л. В данных всех трех этапов уверенно прослеживается высокоамплитудное отражение от канистры. В случаях, когда канистра заполнена жидкостью, отражение становится более низкочастотным и наблюдается инверсия

сигнала. Такой результат говорит о принципиальной возможности не только выявлять полости в закрепном пространстве, но и оценивать наличие воды в них. Сравнение радарограмм над пустой и заполненной рассолом канистрой

приведены на рис. 4.

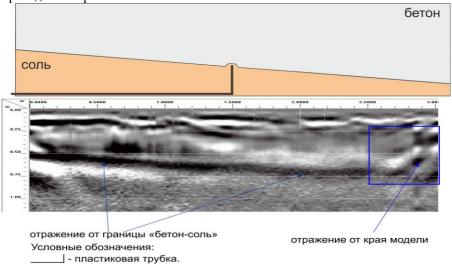


Рис. 3. Результаты георадиолокации на модели

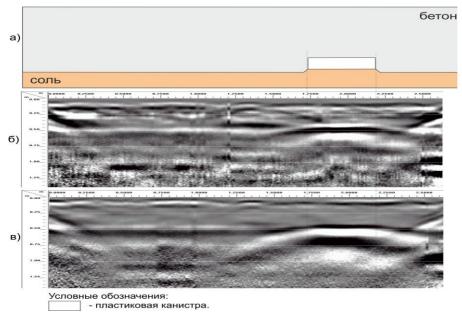


Рис. 4. Результаты георадиолокации: а) схема модели, б) канистра пустая, в) канистра заполнена рассолом

На основе физического моделирования выполнена оценка применимости геофизических методов для обследования бетонной крепи и закрепного пространства. Наиболее подходящими являются два геофизических метода: георадиолокация с применением экранированного антенного блока 400 МГц и ультразвуковая томография.

Обоснованию второго защищаемого положения: «Технология диагностики, основанная на методах георадиолокации и ультразвуковой томографии, позволяющая изучать строение бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов» посвящена глава 3.

Шахтный ствол калийного предприятия — это уникальное технологическое сооружение как с точки зрения конструкции, так и условий эксплуатации. Во-первых, многочисленные расстрелы и направляющие ствола сильно затрудняют как полевые работы, так и интерпретацию данных. Во-вторых, в виду того, что 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. Кроме этого, увлажнение стенок ствола конденсатом также может оказывать влияние на результаты. По мнению автора, именно совокупность этих факторов приводит к низкой эффективности работ методом георадиолокации в стволах ВКМС. Оценка влияния каждого из этих факторов, а так же методов по борьбе с ними необходима для разработки промышленно-применимой технологии диагностики бетонной крепи.

Оценка влияния увлажнение поверхности ствола, проводилась в два этапа: на первом, поверхность бетона была увлажнена незначительно. При этом ни в данных ультразвуковой томографии, ни георадиолокации изменений не отмечено. На втором этапе по поверхности бетона было разлито значительное количество воды, которое привело к образованию луж. Так как, в соответствии с техническими характеристиками, работы томографом A1040 MIRA в таких условиях невозможны, наблюдения выполнены только георадаром. Работы выполнены по профилю, проходящему через три пластиковые канистры. Установлено, что наличие большого количества воды на исследуемой поверхности оказывает влияние на волновую картину, однако несмотря на это радарограмма остается интерпретируемой.

С целью оценки влияния армировки ствола, на поверхности модели были разложены металлические объекты. 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. Анализ результатов так же показывает, что металл, расположенный вдоль или в крест профиля при постоянном прижиме антенного блока к поверхности значительного влияния на результаты не оказывает.

Оценка влияния соляной корки на поверхности ствола выполнялась путем нанесения слоя соли на исследуемую поверхности. На первом этапе толщина такого слоя соли составляла 1,5 см, на втором 3 см.

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

Работы методом георадиолокации выполнены по профилю, проходящему через пластиковые канистры. Результаты опытных работ показывают, что наличие корки толщиной 1,5 см уже сильно скажется на результатах георадиолокации (рис. 5). Теряется четкость выделяемых ранее 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.

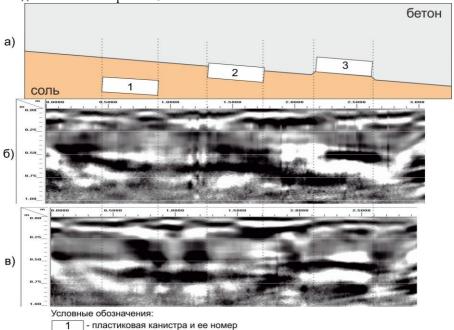


Рис. 5. Сравнение радарограмм: а) схема модели, б) съемка через слой соли около 1,5 см, в) съемка через слой соли около 3 см

**Адаптация методики выполнения полевых наблюдений.** Кроме оценки влияния факторов, которые могут оказывать влияние на качество полевых данных, для разработки технологии необходимо выбрать оптимальную методику проведения полевых работ.

Ультразвуковая томография. Наиболее значимым фактором, влияющим на качество и скорость выполнения работ методом ультразвуковой томографии является шаг наблюдений. Производитель

томографа A1040 MIRA рекомендует шаг наблюдений 100x100 мм. С целью определения возможности повышения производительности выполнены работы по разряженной сети наблюдений. Опытные работы выполнены по сети с шагом 100x100, 200x200 и 300x200 мм. Разрезы построенные вдоль профилей показали, что результаты по сети 100x100 и 200x200мм практически идентичны, незначительные отличия проявляются только в четкости границ мелких объектов. Результаты по сети 300x200мм обладают уже гораздо меньшей точностью, что особенно заметно по смещению границ выделенных объектов (ошибка достигает 50% размера объекта). Разрезы, построенные в крест профилей, также показывают ухудшение точности с увеличением шага съемки. Это выражается как в точности привязки границ, так и искажении их формы. Так, при шаге 200 мм между профилями отражение от границы бетон-соль на некоторых участках модели отображается практически горизонтальным, тогда как реальная граница расположена под углом к поверхности наблюдений.

Резюмируя вышесказанное можно заключить, что оптимальный шаг съемки, позволяющий сохранить высокую точность данных при исследовании бетонной крепи, составляет 200х100 мм (где 200 мм — шаг пикетов воль профиля, 100 мм — расстояние между профилями).

Георадиолокация. 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. около 0,5 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. Так как производитель радаров SIR-3000 (фирма GSSI) поставляет с антенной 400 МГц только один вид колеса-одометра, непредназначенное для выполнения работ на вертикальных поверхностях. Нитяной одометр отчасти решает проблему, 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.

В качестве решения этой проблемы, автором предложена модификация «колеса-одометра» 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 блоком 400 МГц. Незначительная модификация конструкции крепежной планки дает возможность использовать его с антенной 400 МГц.

Предложенная модификация позволяет надежно закрепить колесо на передней части антенного блока (рис. 6). В свободном положении колесо выступает за нижнюю точку антенного блока примерно на 2 см, а за счет пружинного механизма обеспечивается уверенная работа даже на неровных поверхностях.

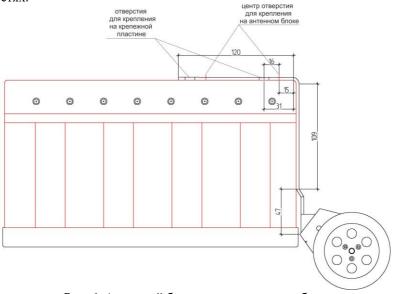


Рис. 6. Антенный блок с одометром вид сбоку

С целью апробации на практике, выполнены опытные работы в стволе № 3 рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» (рис. 7). Анализ результатов опытных работ подтверждает выводы, сделанные по результатам физического моделирования. Результаты наблюдений были заверены бурением шпуров, которые подтвердили эффективность выполненных исследований. Комплекс проведенных исследований позволил разработать технологию проведения диагностики бетонной крепи шахтных стволов, основными положениями которой являются:

- отрыв антенны георадара от поверхности при выполнении зондирования приводит к браку получаемого материала;
- соляная корка оказывает значительное влияние на качество материала, поэтому поверхность должна быть зачищена;
- влажная, но свободная от соляной корки поверхность мало сказывается на качестве материалов;
- наиболее удобным в эксплуатации является колесо-одометр диаметром 5-10 см с пружинным механизмом для нивелирования неровностей бетона, менее удобным, но приемлемым нитяной одометр;
- даже после очистки поверхности бетона от соляной корки очень сложно выбрать место для качественного прижима томографа к поверхности,

как результат – применять томограф возможно лишь в точечном режиме. По этой причине основной режим работы, рекомендуемый для акустического томографа – точечное определение мощности бетона в пределах георадарных

профилей, для привязки результатов георадиолокации по глубине.

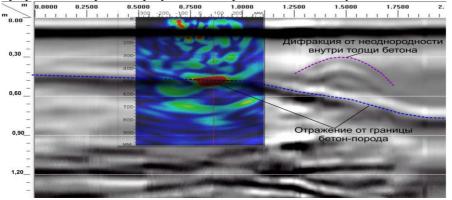


Рис. 7. Результат комплексного анализа данных георадиолокации и акустической томографии

Обоснованию третьего защищаемого положения: «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» посвящены главы 4 и 5.

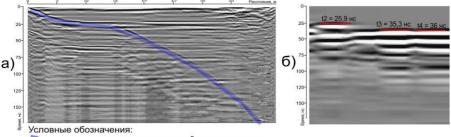
К настоящему времени георадар зарекомендовал себя как надежный инструмент с высокой разрешающей способностью, применяемый для широкого круга задач в геологии, инженерных изысканиях, археологии, строительстве и в горнодобывающей промышленности. Известны примеры использования георадара на калийных рудниках Канады, Германии, Франции и других стран. Однако исследования показывают, что успешное применение георадиолокации требует адаптации к местным горно-геологическим условиям. По мнению автора, именно пропуск фазы адаптации (оценки параметров массива солей BKMC) стал причиной недостаточной эффективности метода при решении практических задач в начале 2000-х годов, что привело к отказу от использования данной технологии. Уточнение этих параметров позволит определить круг задач, решение которых возможно методом георадиолокации в условиях рудников ВКМС.

Опытные работы по определению скорости распространения электромагнитных волн в солях проведены в шахте рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». Для выполнения полевых работ использован георадар SIR-3000 и антенные блоки 100, 200, 400 МГц. При проведении работ использовались методики: профилирование и просвечивание. Так как состав

солей (и их физические свойства) отличаются, работы проводились по всем пластам, на которых ведутся горные работы: КС, КР II, АБ, Вс.

**Профилирование.** Работы проводились по стенкам межкамерных целиков переменной мощности экранированным антенным блоком на постоянной базе источник-приемник. Ширина целиков на исследуемых участках изменялась от первых сантиметров (профиль начинался в начале целика) до первых десятков метров. Так как ширина целиков определена маркшейдерами с высокой точностью, скорость волн определялась как отношение мощности к времени двойного пробега волны. На рисунке 8, *а*, приведен пример радарограммы по одному из участков.

Просвечивание. 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. При проведении работ выбирался целик на интересуемом пласте, приемный и передающий антенные блоки располагались по разные стороны целика на допустимых разносах. В частности, при работах на пласте Кр II измерения были выполнены в трех точках (рис. 86).



- 🦴 отражение от противоположной стенки целика;
- t2 время прихода волны;
- ось синфазности первого вступления.

Рис. 8. Работы по скрости Э/М волн в солях: а) радарограмма по методике профилирование, б) радарограмма по методике просвечивание

Применение двух взаимодополняющих подходов позволило определить скорость распространения электромагнитных волн для различных типов солей. При этом данные, полученные по двум методикам, достаточно уверенно согласуются друг с другом. Обобщенные результаты определения скоростей электромагнитных волн представлены в таблице 1.

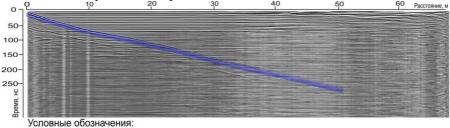
На данном этапе важно отметить одну интересную особенность, выражающуюся в зависимости скорости распространения электромагнитных волн от мощности целика. По мнению автора, различие скоростей распространения электромагнитных волн может быть связано с изменением физических свойств приконтурной части целика. Т.е. чем старше целик, тем большая его часть подвержена деформациям и тем меньше скорость распространения электромагнитных волн. Минимальным изменением скорости относительно мощности характеризуются пласты АБ и Вс, 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. Абсолютные значения скорости так же возрастают по мере уменьшения возраста целика. Полученные результаты указывают на принципиальную возможность установления корреляционной связи между скоростью распространения электромагнитных волн и шириной зоны междукамерного целика, подверженной деформациям, что в свою очередь позволит разработать технологию оперативного контроля фактической несущей способности междукамерных целиков.

Таблица 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 AB, см/нс	Скорость в пласте Вс, см/нс	Средняя скорость, см/нс
100 МГц	9,6	11.5	12	13	
200 МГц	10.5	11.5	12,5	12.5	11.7
400 МГц	10	11.5	12.7	13	

Опытные работы по определению эффективной проникновения электромагнитных волн в солях в условиях естественного залегания проведены в шахте рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» в 2016 году. Для выполнения полевых работ использован георадар SIR-3000 и антенные блоки 100, 200, 400 МГц. Работы выполнены по методике профилирования на постоянной базе источник-приемник по стенкам междукамерных целиков на пластах КС, КР II, АБ, Вс. Ширина целиков на исследуемых участках изменялась от первых сантиметров до первых десятков В качестве примера определения глубины по результатам профилирования на рис. 9 приведен результат работ с антенным блоком 200 МГц по пласту Кр II, на радарограмме отчетливо видна точка исчезновения отражения от противоположной стенки целика.



📞 отражение от противоположной стенки целика.

Рис. 9. Радарограмма полученная с антенной 200 МГц. Пласт Кр II В таблице 2 представлены сводные результаты определения максимальной эффективной глубины распространения электромагнитных волн. В указанной таблице приведены как результаты по отдельным пластам, так и осредненные значения.

Таблица 2

Глубина распространения электромагнитных волн в солях

Центральная частота	КС,	KPII,	AB,	Bc,	Среднее,
антенного блока	M	M	M	M	M
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

Результаты исследований по соляным породам указывают на перспективность применения метода георадиолокации. Эффективная глубина проникновения электромагнитных волн для частоты 100 МГц достигает 14 м. Средняя скорость распространения электромагнитных волн 11,7 см/нс. Дополнительным подтверждением применимости георадара для решения производственных задач стали работы по уточнению местоположения горной выработки с вышележащего горизонта, которые показали, что георадар позволяет уверенно определять местоположение выработки.

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.

Таким образом, применение георадиолокации в шахте возможно и перспективно. Основным направлением является уточнение геологического строения массива, а также мониторинг процессов его изменения в результате горных работ. Выполненные исследования позволили автору выделить четыре наиболее перспективные и задачи, решение которых возможно в условиях ВКМС посредством георадиолокации:

- 1. обследование кровли горных выработок с целью раннего обнаружения областей заколообразования;
- 2. контроль параметров в процессе проходки горных выработок;
- 3. оценка полноты закладки горных выработок;
- 4. оценка динамики изменения физико-механических свойств целиков и междупластий.

И в 2017 году, впервые на ВКМС начаты о опытно-промышленные испытания технологии, позволяющей выполнять оценку полноты закладки камер методом георадиолокации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы автором выполнена разработка и адаптация технологии работ методами георадиолокации и ультразвуковой томографии к условиям вертикальных стволов калийных шахт, а также дана 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 оказались информативными геофизических два 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. Анализ результатов проведенных исследований позволил разработать технологию диагностики бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов, основанную на двух взаимодополняющих методах: георадиолокации и ультразвуковой томографии. В 2017 году автором получен патент № 2624799 «Способ комплексной диагностики состояния бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов».
- 3. Выполнена оценка скорости распространения и максимальной эффективной глубины проникновения электромагнитных волн для различных типов солей в условиях естественного залегания. 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 диссертационной работы, является применение предложенных технологий в производственной деятельности:
- в 2016 году выполнены работы по обследованию зумпфовой части ствола рудника СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». В результате проведения работ были выявлены полости за крепью, а также участки значительного увеличения/уменьшения мощности крепи. Все выявленые аномалии в последствии были заверены бурением, найденные полости ликвидированы;
- в 2017 году на рудниках ПАО «Уралкалий» начаты опытнопромышленные 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 проведении работ из выработок пласта АБ.

## Основное содержание диссертации отражено в следующих работах, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК России:

- 1. Жуков А.А., Пригара А.М., Тарасов В.В., Царев Р.И. Комплексная диагностика бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников // Горный журнал, 2014, N 4, C.81-87.
- 2. Жуков А.А. Разработка и адаптация технологии диагностики бетонной крепи шахтных стволов калийных рудников // горный информационно-аналитический бюллетень, 2016, № 8, С.245-254.
- 3. Жуков А.А., Пригара А.М., Пушкарева И.Ю., Царев Р.И. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях верхнекамского месторождения калийных солей // Инженерные изыскания, 2017, № 3, С.28-33.
- 4. Жуков А.А., Пригара А.М., Пушкарева И.Ю., Царев Р.И. Оценка глубины проникновения электромагнитных волн в солях ВКМС // Геофизика, 2017, № 5, С.25-28.
- 5. Пат. 2624799, Российская федерация, МПК G01V 1/00. Способ комплексной диагностики бетонной крепи и закрепного пространства шахтных стволов / Авторы: А.А. Жуков, А.М. Пригара, И.Ю. Пушкарева, В.В. Тарасов. Заявка: 2016119277, 18.05.2016; опубл.06.07.2017, бюл. №19