

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2024.2.5

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА МЕЖКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

В.Ю. Бобров

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: На территории шахтного поля Верхнекамского месторождения калийных солей произведено опробование ультразвукового томографа A1040 MIRA 3D с разным частотным составом возбуждаемых колебаний с целью оценки состояния межкамерного пространства. Реализована процедура конвертации данных томографа в формат сейсмических данных, с возможностью последующей обработки и интерпретации. Выделенные волновые формы по результатам обработки соответствуют известной геометрии изучаемого объекта.

Ключевые слова: томография, горные выработки, межкамерный целик, поперечные волны.

Введение

Одним из важных аспектов безопасной разработки и эксплуатации месторождений солевого типа является оперативный контроль состояния породного массива межкамерного пространства шахтного поля. В частности, прогноз остаточного срока службы межкамерных целиков, основанный на информации об ослаблении прочностных свойств пород в приконтурной части целика [1].

Основной причиной возникновения закономерностей в распределении параметров, характеризующих свойства пород вокруг выработки после её проходки, является перераспределение горного давления в массиве (рис. 1) [1].

Область массива, не попадающая под влияние горных работ (рис. 1, 5), находится в состоянии упругого напряженного равновесия. В направлении к центру выработки ее сменяет зона пригрузки (рис. 1, 4) с повышенными напряжениями. Далее следует зона разгрузки с низкими напряжениями (рис. 1, 3) и ослабленными породами и зона максимальной нарушенности массива (рис. 1, 2). Границы зон определяются свойствами пород массива, размерами и возрастом выработки, а также величиной естественных напряжений [2 – 10].

Сейсмоакустическое просвечивание на отраженных волнах является наиболее перспективным инструментом для изучения массива в подобных условиях [11]. Опыт предыдущих работ методом сейсмического просвечивания на отраженных волнах доказывает возможность формирования устойчивых отражений на границах зоны влияния выработки [12].

К недостаткам данного метода можно отнести:

- необходимость в креплении геофонов в стенки целиков в соответствии с направлением излучения;
- непостоянство характера возбуждения и отсутствие регулировки частотного диапазона возбуждаемого импульса при использовании ручного источника упругих колебаний;
- трудоемкий и ресурсозатратный процесс отработки с привлечением нескольких единиц персонала;
- низкая оперативность получения информации.

Для изучения породного массива в подобных условиях с исключением недостатков сейсмоакустического просвечивания, рассмотрена возможность применения ультразвукового томографа A1040 MIRA 3D PRO.

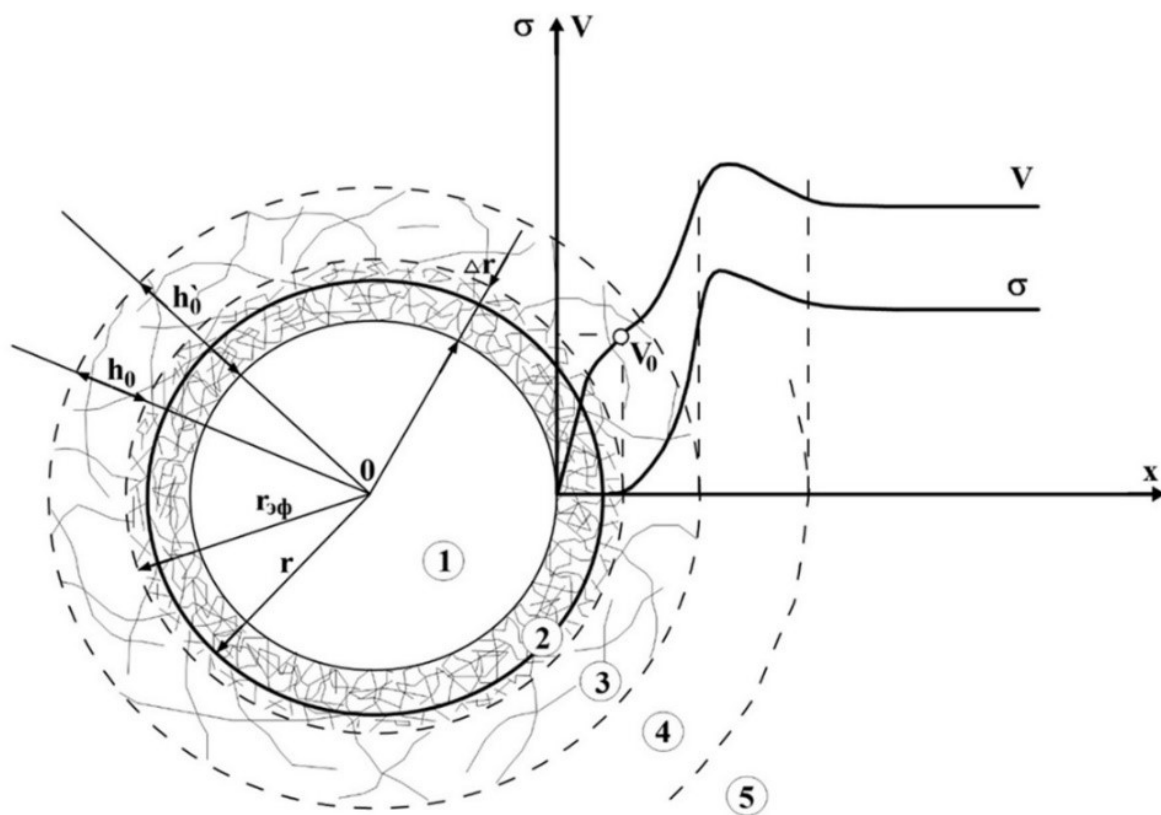


Рис. 1. Выделение зон различных напряжений в окрестности горной выработки по данным сейсмоакустических измерений по материалам Р. П. Савича, В. И. Коптаева [1]
 1 – полость выработки; 2 – зона интенсивного нарушения пород; 3 – зона разгрузки напряжений;
 4 – зона пригрузки напряжений; 5 – неизменная часть массива; r – радиус выработки;
 $r_{эф}$ – эффективный радиус выработки; Δr – радиальная деформация стенок выработки;
 h'_0 – суммарная мощность зоны разрушенных и ослабленных пород;
 h_0 – мощность зоны ослабленных пород.

Техническое описание устройства

Томограф A1040 MIRA 3D PRO предназначен для обследования монолитных конструкций с целью поиска пустот, каналов, силовой арматуры, инородных включений, расслоений, трещин и прочих полостей, как пустых, так и заполненных жидкостью или твердым материалом, отличающимся от окружающего массива физико-механическими свойствами. Также имеется возможность измерения толщины объекта контроля при одностороннем доступе.

Прибор позволяет:

- быстро и эффективно обследовать обширные объекты с полным документированием результатов и возможностью их предварительного анализа;
- производить комплексную оценку внутренней структуры массива;
- получать мгновенное отображение результатов измерений.

Томограф A1040 MIRA 3D PRO состоит из двух электронных блоков и переносного мобильного устройства, которое выполняет функции сбора/хранения данных, отображения результатов измерений и управления устройством (рис. 2). Подключение электронных блоков с мобильным устройством реализуется по каналу Wi-Fi.

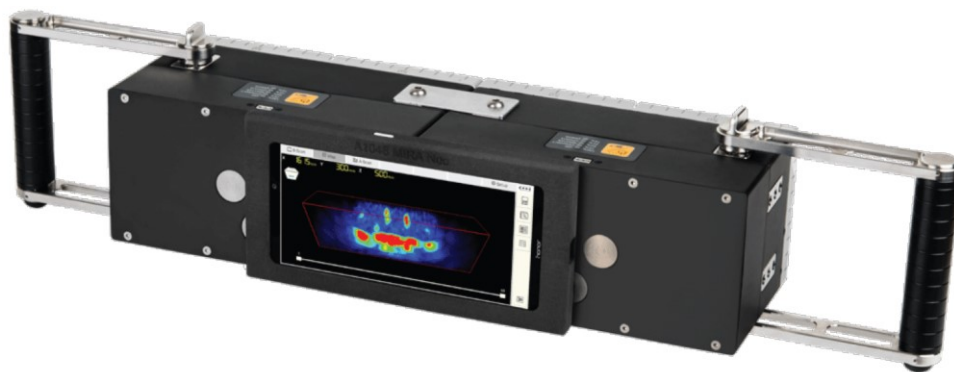


Рис. 2. Внешний вид томографа A1040 MIRA 3D PRO

Каждый электронный блок имеет антенную решетку с размерами 10 x 20 см (рис. 3, А) состоящую из 32 независимых активных широкополосных преобразователей поперечных волн с сухим точечным контактом с керамическими износостойкими наконечниками (рис. 3, Б).

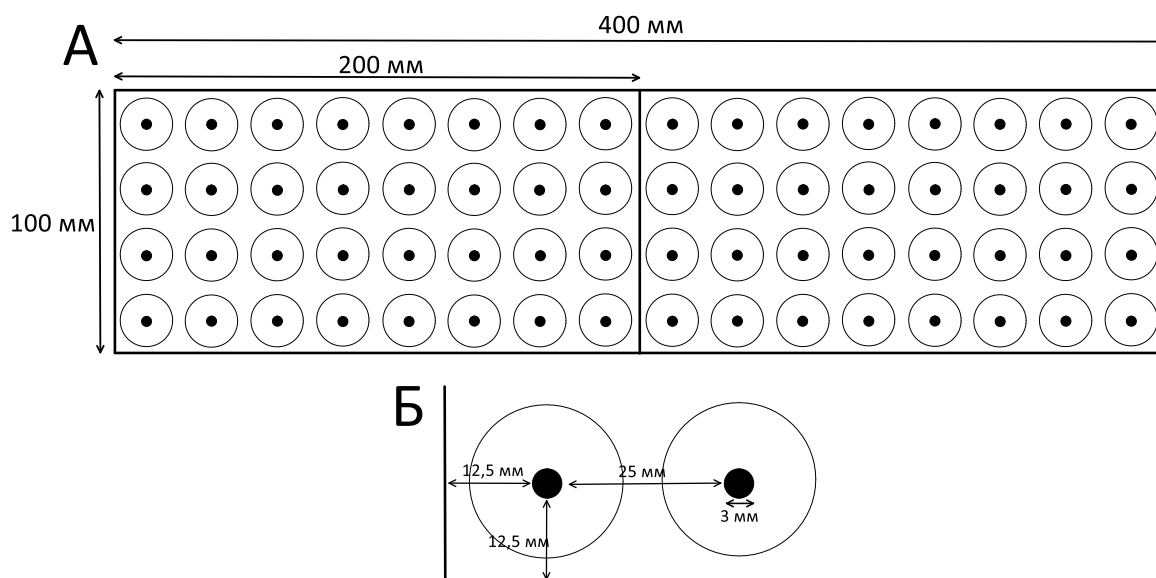


Рис. 3. Схема антенной решетки электронных блоков
А – размеры решетки; Б – размеры преобразователей

Каждый преобразователь одновременно является источником и приемником упругих колебаний. В зависимости от поставленных задач, работа устройства реализована в линейном и матричном режимах, отличающихся между собой комбинацией приемных и возбуждаемых преобразователей.

В томографе реализована функция автоматического определения скорости распространения волн в среде.

В нижней части томографа расположены шесть лазеров класса 2М для лучшего позиционирования прибора на объекте контроля.

Работа устройства реализована на многократной регистрации отраженных волн с последующим накоплением сейсмических сигналов по методике общей глубинной точке (МОГТ).

Основные технические характеристики устройства приведены в таблице 1.

Заявленный частотный диапазон, при средней скорости поперечных волн 2200 м/с на схожих исследуемых объектах [11], обеспечивает регистрацию колебаний с длинами волн 0,022-0,22 метра. Если принять во внимание общепринятые предельные значения

вертикальной разрешающей способности $\lambda/4$, то размеры выделяемых объектов будут составлять от 0,0055 метров при установленной частоте импульса преобразователя 100 кГц и от 0,055 метров при частоте 10 кГц.

Таблица 1

Технические характеристики томографа A1040 MIRA 3D PRO

Параметр	Значение
Диапазон рабочих частот (генерируемых и регистрируемых), кГц	10 – 100
Диапазон устанавливаемых скоростей, м/с	1000 – 4000
Кол-во преобразователей в антенной решетке, шт	32
Общее кол-во преобразователей в приборе, шт	64
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения толщины, мм	$\pm (0,05X+10)$ (X – измеряемая толщина)
Продолжительность непрерывной работы, ч	> 6
Температурный режим, °С	-10 / +50
Класс защиты	ip54

Экспериментальное опробование томографа

С целью практической оценки возможности применения томографа A1040 MIRA 3D PRO для контроля состояния породного массива в пределах горной выработки, в пределах шахтного поля Верхнекамского месторождения произведены измерения межкамерного целика с двухсторонним доступом.

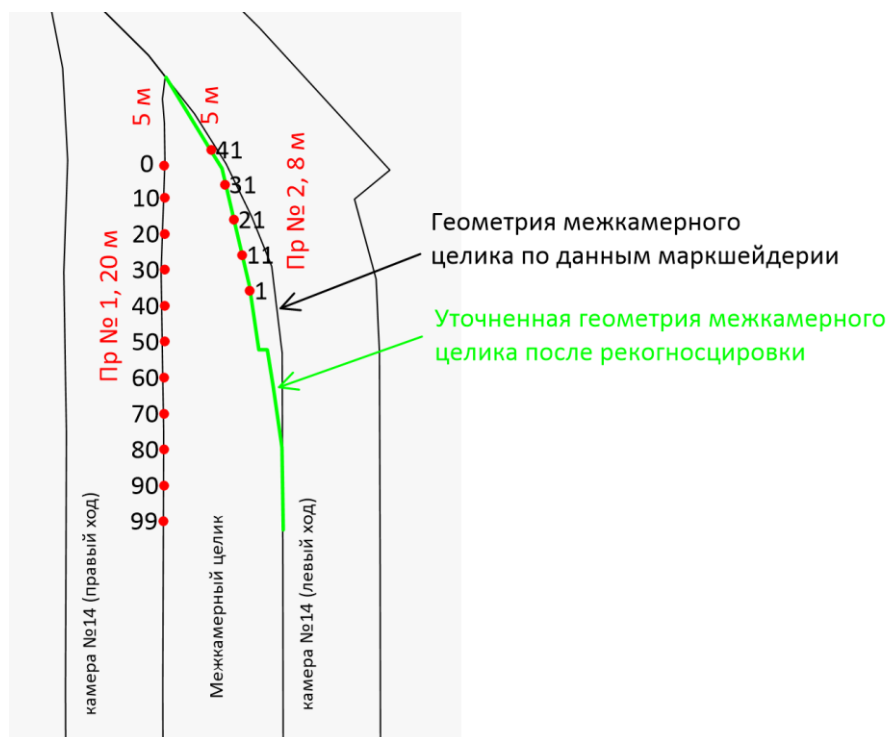


Рис. 4. Схема исследуемого объекта

В рамках исследования отработано две профильных линии (рис. 4). Профильная линия № 1 включает в себя 99 точек наблюдений, профильная линия № 2 включает 41 точку. Каждая профильная линия отработана повторно с разной рабочей частотой импульса возбуждения преобразователей: 10, 20 и 30 кГц. Шаг между измерениями по линии профиля составил половину корпуса томографа – 20 см. Режим решетки – линейный.

Перед началом работы существует необходимость в установке известной скорости ультразвуковых волн в материале объекта контроля. Ссылаясь на теоретические предположения [11], и на показания автоматического определения скорости, что входит в функционал оборудования, для данного исследуемого объекта скорость распространения непродольных волн составила 2200 м/с.

Измерения производились без подготовительных работ на профильных линиях с привлечением персонала в количестве двух человек. Средняя отработка одной физической точки составило 1-2 секунды.

Результаты томографического исследования

Конечным результатом измерений является получение послойного изображения внутренней структуры объекта – томограммы. Визуализация и интерпретация результатов осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения «IntroView Concrete». Структуры, отличающиеся от исследуемого массива физико-механическими свойствами, на томограммах отображаются в виде повышенных значений амплитуд отраженных волн поперечного типа.

По результатам измерений получен набор томограмм с разным частотным диапазоном (рис. 5). На томограммах по профильной линии № 1 с рабочей частотой импульса возбуждения преобразователей 10 кГц и 20 кГц (рис. 5, А), на глубине 3 метров выделяется ось, приуроченная к границе массива. Ссылаясь на схему изучаемого объекта, расположение границы соответствует геометрии межкамерного целика.

На томограммах по профильной линии № 2 (рис. 5, Б) граница отсутствует. Предполагается, что данное явление связано с рассеиванием сигнала из-за плохих условий на поверхности наблюдения. В частности – значительные неровности, в следствии чего отсутствует возможность полного прижима антенной решетки к поверхности межкамерного целика.

На всех томограммах, в пределах первого метра от поверхности наблюдения, прослеживается нерегулярная зона с повышенными значениями амплитуд. Предполагается, что данная область приурочена к зоне максимальной нарушенности массива, характеризующаяся трещиноватостью и ослаблением пород.

Зоны максимальной нарушенности имеют схожую геометрию на каждой профильной линии при каждом повторном измерении с изменением рабочего частотного диапазона, что указывает на высокую достоверность получаемых результатов.

К недостаткам применения ультразвукового томографа A1040 MIRA 3D для решения подобного рода задач можно отнести:

- программное ограничение длины записи сигнала. Стандартные настройки программного обеспечения устройства ограничивают глубину исследования до 3.5 метров в независимости от выбранной скорости распространения упругих волн;
- отсутствие возможности обработки полученных данных. Данные, получаемые при томографии, имеют специфический формат, реализованный только для визуализации и интерпретации непосредственно в программном обеспечении томографа и программы «IntroView Concrete».

Для обхода вышеупомянутых недостатков реализована процедура конвертации данных томографа в формат сейсмических данных, с возможностью последующей обработки.

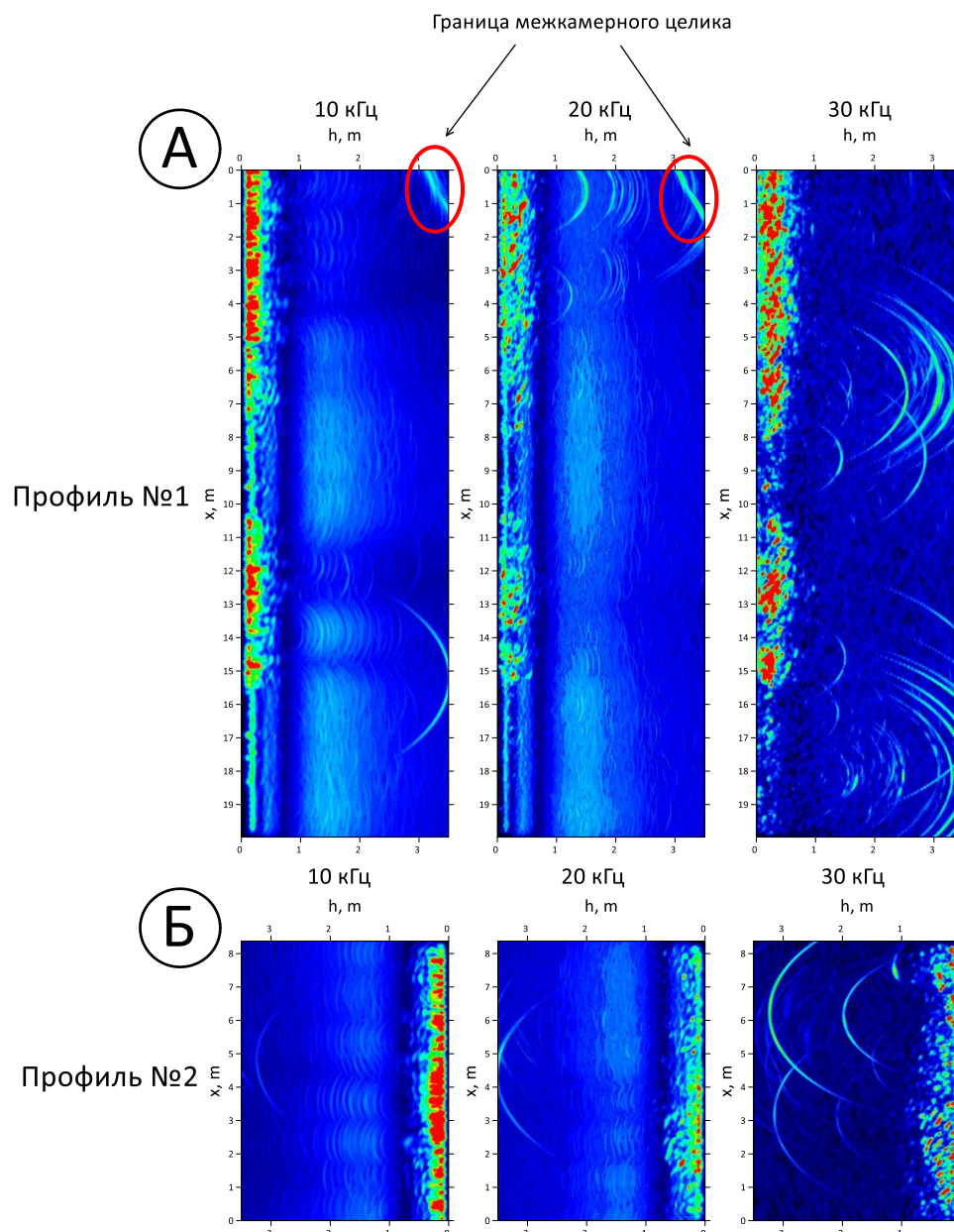


Рис. 5. Визуализация томограмм, полученных с частотой импульса возбуждения 10, 20, 30 кГц. А – набор томограмм по профилю № 1; Б – набор томограмм по профилю № 2

При линейном режиме антенной решетки, запись данных единичного наблюдения происходит следующим образом. Преобразователи в решетке томографа A1040 MIRA 3D располагаются в комбинации 4x16. В начальной фазе записи первый ряд, состоящий из 4 преобразователей, работает в режиме генерации упругих колебаний в заданном частотном диапазоне, а ряды 2 – 16 выступают в качестве приемников. Во второй фазе, второй ряд преобразователей генерируют колебания, а ряды 3-16 работают приемниками, при этом предыдущий ряд, отвечающий за генерацию колебаний в первой фазе, переходит в режим ожидания и не участвует в последующей работе. По такому алгоритму в рамках единичного наблюдения, происходит отработка всей площади антенной решетки.

Зная комбинацию возбуждаемых и принимаемых преобразователей при линейном режиме антенной решетки, в рамках одного измерения получается 15 сейсмограмм с разным количеством трасс (рис. 6).

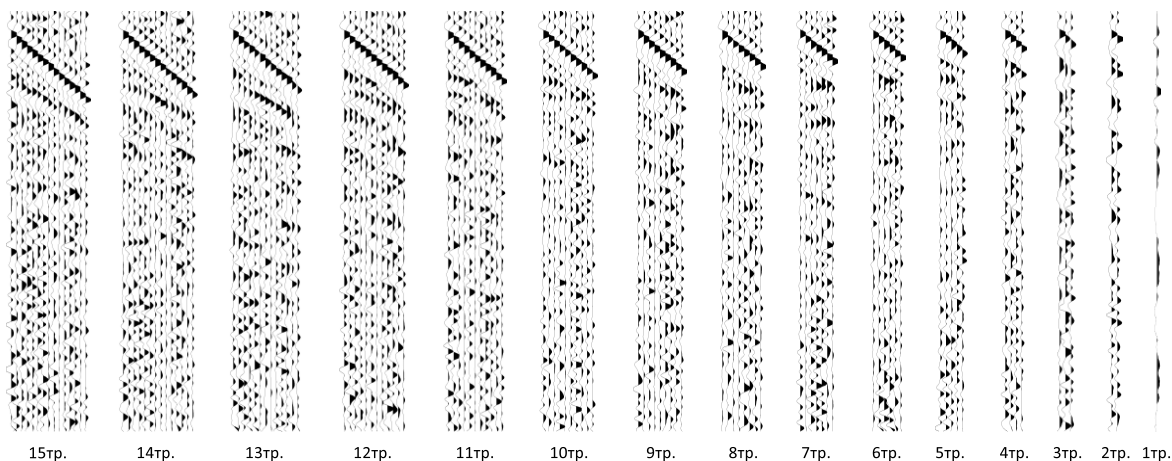


Рис. 6. Набор сейсмограмм, получаемый в ходе обработки 1 физической точки

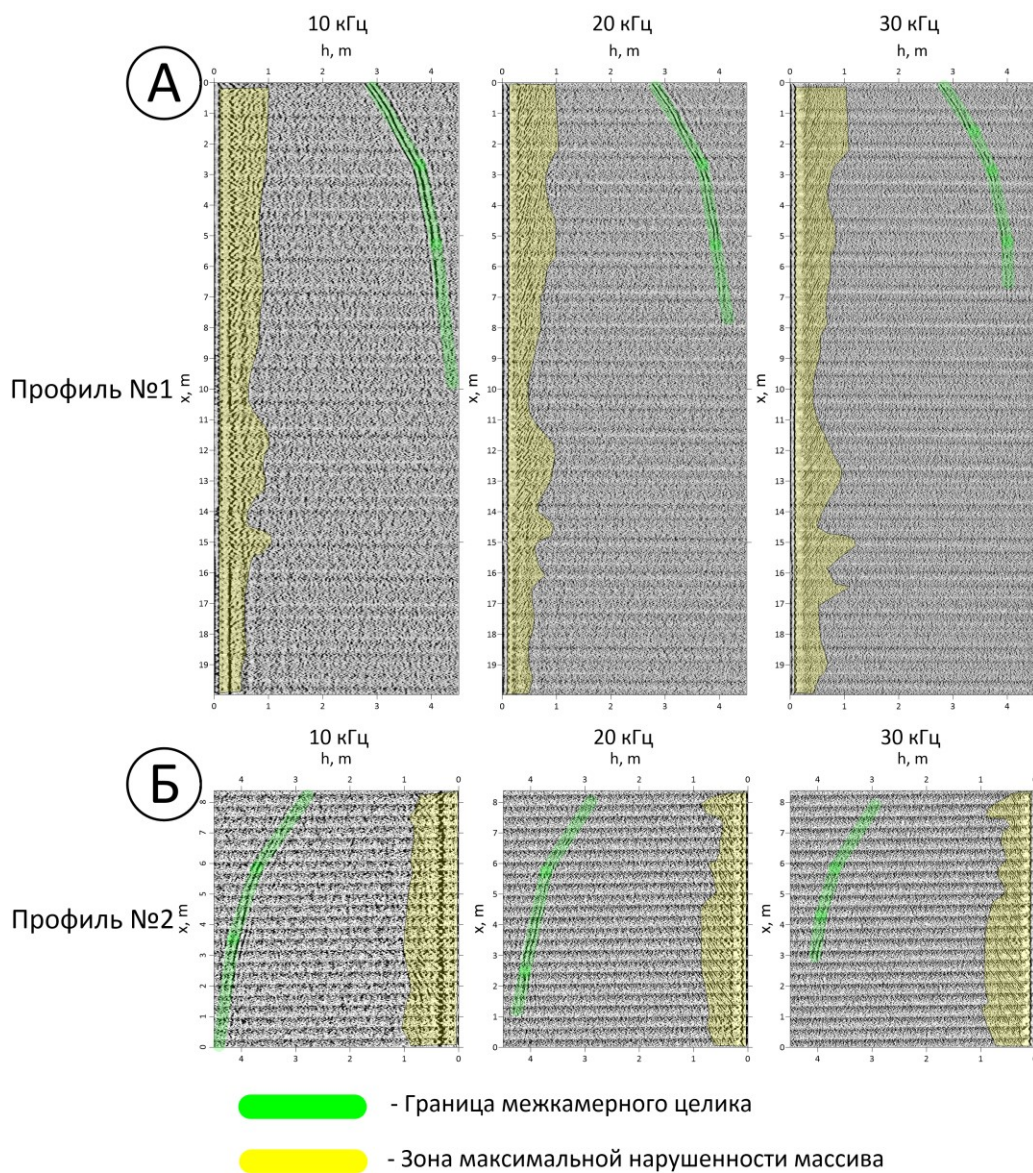


Рис. 7. Глубинные разрезы, полученных с частотой импульса возбуждения 10, 20, 30 кГц.
А – глубинные разрезы по профильной линии № 1;
Б – набор глубинных разрезов по профильной линии № 2

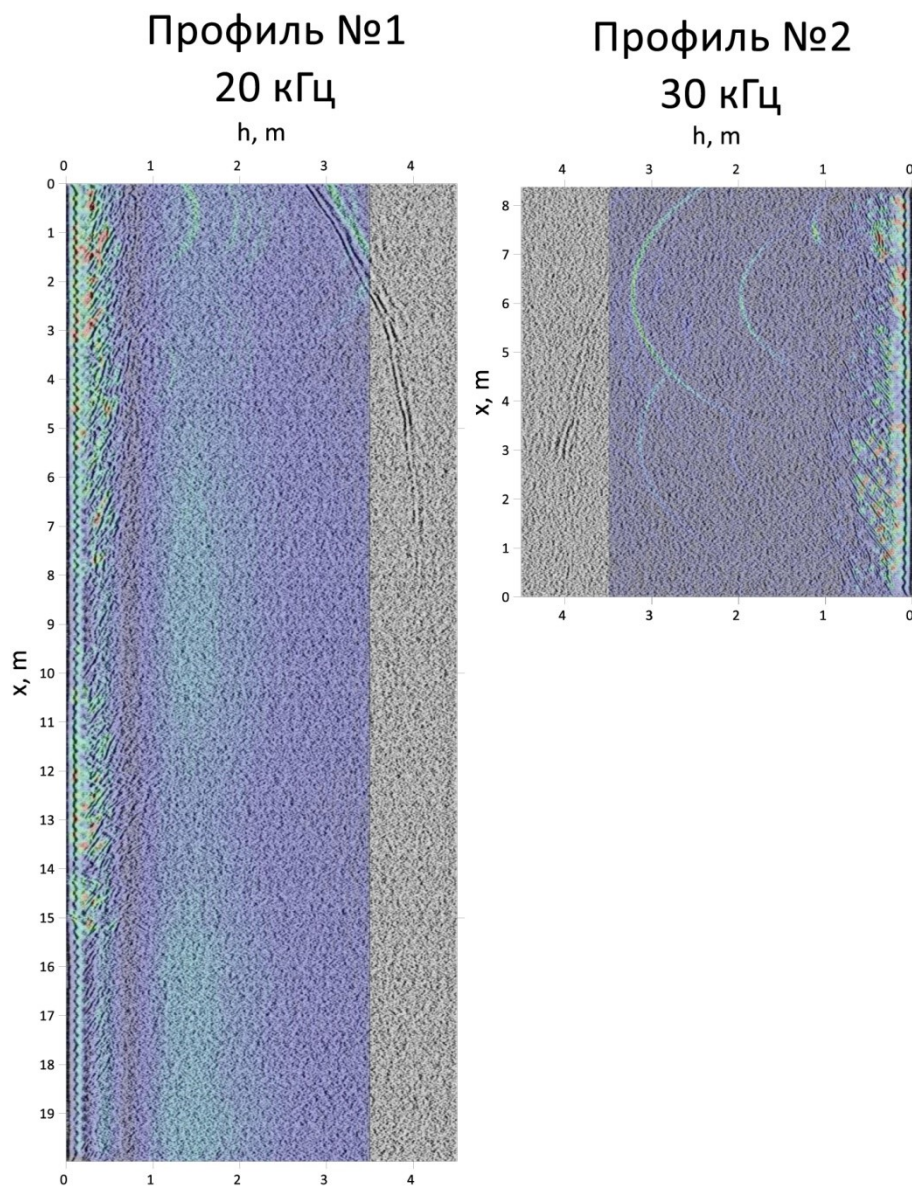


Рис. 8. Сопоставление томограмм и глубинных разрезов

В процессе конвертации данных томографа в сейсмический формат, длина записи сигнала больше не подвержена программному ограничению по глубине, а зависит только от аппаратного ограничения. Длина конвертированной сейсмической записи составляет 4096 дискрет.

Далее последовала пересортировка сейсмограмм, с учетом расстояния между преобразователями и смещением по линии наблюдения.

По полученным сейсмограммам произведена цифровая обработка со специализированным графом, включающий процедуры:

- центрирование трасс;
- автоматическая регулировка усиления трасс;
- нуль-фазовая полосовая фильтрация;
- минимально-фазовая предсказывающая деконволюция;
- ввод кинематических поправок;
- суммирование сейсмограмм с сортировкой по общей глубинной точке.

Результатами цифровой обработки являются глубинные разрезы (рис. 7). В связи с увеличением длины записи по ходу конвертации данных и применением цифровой об-

работки, на всех глубинных разрезах устойчиво прослеживается граница межкамерного целика. Расположение границы полностью соответствует известной геометрии объекта. Так же, на всех полученных разрезах выделяется аномальная область, приуроченная к зоне максимальной нарушенности массива. В связи с физикой распространения упругих волн, при повышенном диапазоне рабочих частот, зона максимальной нарушенности выделяется более выразительно, в то время как граница межкамерного целика лучше прослеживается на низких частотах.

При сравнении томограмм (рис. 5) с конечными глубинными разрезами (рис. 7), уверенно прослеживается сходство волновых форм, приуроченных к зонам максимальной нарушенности массива и границ межкамерного целика (рис. 8).

Выводы

Результаты эксперимента указывают на возможность применения ультразвукового томографа A1040 MIRA 3D для оперативного контроля состояния межкамерных целиков. В частности, возможность определения положения границ зон техногенной нарушенности и определения толщины массива. Конвертация данных томографии в сейсмический формат с последующей обработкой позволяет обеспечить наибольшую детальность и информативность результатов исследования.

Применение томографа A1040 MIRA 3D при решении подобного рода задач отличается быстрой обработкой больших объемов площадей без предварительной подготовки. Мгновенное отображение результатов съемки обеспечивает детальный контроль процесса работ. Модульная конструкция и малые габариты томографа позволяют производить замеры с привлечением не более 1-2 членов персонала.

Для получения более информативного волнового поля, существует необходимость в аппаратном увеличении длины записи сигнала. Так же рассматривается возможность разноса электронных блоков томографа сверх модульной базы конструкции, что в дальнейшем позволит увеличить базу наблюдений, повысить глубинность и кратность исследований и позволит производить скоростной анализ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 1022040500578-0-1.5.6)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савич Р.П., Коптев В.И. Изучение напряжённого состояния массивов скальных пород сейсмическими методами в связи со строительством подземных гидротехнических сооружений // Актуальные проблемы изысканий проектирования и строительства гидротехнических туннелей большой протяженности. – М., 1981. – С. 42-65. – (Сб. науч. тр. Гидропроекта: Вып. 78).
2. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Паньков И.Л., Бруев А.Н. Оценка состояния междукамерных целиков при отработке запасов калийных руд под территорией городской застройки // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): докл. междунар. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 1998. – Т. 3. – С. 40-45.
3. Барях А.А., Асанов В.А., Токсаров В.Н., Гилев М.В. К оценке остаточного срока службы соляных междукамерных целиков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1998. – № 1. – С. 18-25.
4. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
5. Водопьянов В.Л., Габдрахимов И.Х. Напряжение карналлитовых целиков Соликамского рудника // Тр. Пермь НИУИ: сб. ст. – Пермь, 1964. – Вып. 6. – С. 123-129.
6. Зильбершмидт В.Г., Зильбершмидт В.В., Наймарк О.Б. Разрушение соляных пород: [науч. изд.] / [отв. ред. И.В. Баклашов]. – М.: Наука, 1992. – 144 с.
7. Зильбершмидт В.Г., Тинантеев О.А. Исследование влажности горного соляного массива и её влияние на прочностные свойства пород Верхнекамского калийного месторождения // Технология и безопасность горных работ: сб. ст. / ППИ. – Пермь, 1976. – С. 132-137.

8. Зильбершмидт В.Г., Тинантеев О.А. Экспериментальное определение зон трещинообразования в массивах соляных пород Верхнекамского калийного месторождения реометрическим методом // Разработка соляных месторождений: межвуз. сб. науч. тр. / ППИ. – Пермь, 1974. – С. 54-58.
9. Мараков В.Е., Нестеров М.П., Непримеров А.Ф. Изменение напряжений в сильвинитовых целиках в зависимости от их возраста и расположения в выработанном пространстве // Напряжённое состояние породных массивов: сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1978. – С. 3-5.
10. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: (Петрофизика). Справ. геофизика / под ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, – 1984. – 455 с.: ил.
11. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
12. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Сальников А.П. Контроль состояния горного массива методами многоволновой шахтной сейсморазведки // Горн. вестн. – 1998. – № 6. – С. 94-99.

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2024.2.6

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ

С.Г. Бычков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Гравиметрические исследования Верхнекамского месторождения калийных солей проводились с середины 1920-х годов с помощью гравитационных вариометров. С конца 50-х годов с появлением высокопроизводительных кварцевых гравиметров начаты планомерные гравиметрические исследования месторождения. Гравиметрическими партиями Баженовской геофизической, Пермской геологоразведочной, ФГУП «Пермрудгеофизика» и Научно-производственной геофизической экспедицией Горного института УрО РАН съемки разных масштабов проведены практически на всей территории месторождения. Эти работы позволили построить сводную гравиметрическую карту, которая отражает основные элементы геологического строения Верхнекамского месторождения калийных солей.

Ключевые слова: гравиразведка, аномалии силы тяжести, изученность, соли, Верхнекамское месторождение.

Гравиразведка была первым геофизическим методом изучения Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Как докладывалось на Первой Всесоюзной геофизической конференции в 1932 г.: «В Соликамском районе с 1926 г. по 1931 г. взято около 2300 пунктов и исследована площадь около 150 км². ... В основном исследование гравиметрической разведкой Соликамского калийного месторождения можно считать законченным ... Все будущие рудники – шахтные поля исследованы гравиметрической разведкой» [1].

Здесь не случайно использован глагол «взято». Съёмки производились гравитационными вариометрами. Это громоздкие и тяжелые приборы транспортировались груженым транспортом, а каждое измерение длилось несколько часов, поэтому можно представить трудоемкость этих съёмок. Вариометры измеряли вторые производные потенциала силы тяжести, что позволяло определить величину и направление наибольшего градиента силы тяжести. (Эти съёмки вспоминал В.М.Новоселицкий: «новое – это хорошо забытое старое», когда обосновывал метод векторного сканирования гравитационного поля, основанный на вычислении векторов горизонтальных градиентов, имея в виду высокую чувствительность к плотностным неоднородностям градиентов, определяемых вариометром, по сравнению с данными последующих гравиметрических съёмок [6]).