

Эта зона состоит из кольцевых зон концентрации напряжений и зон разгрузки напряжений, вплоть до образования зон трещиноватости. Во всех этих зонах меняются петрофизические свойства и, в том числе, упругие характеристики горных пород. Таким образом, линейные размеры такой техногенной неоднородности, типа «ствол», увеличиваются по сравнению с диаметром ствола в свету. Это обстоятельство требует более детальных исследований изменения динамических характеристик упругих волн.

Выводы

Таким образом, выделяются локальные области уменьшения энергии доминантной частоты при наличии в разрезе скоростных неоднородностей. Выделяются локальные области повышенной энергии высокочастотных составляющих спектра сейсмического сигнала при наличии в разрезе зоны мелких разноориентированных трещин. На разрезах амплитудного спектра локальные области существенного уменьшения энергии высоких частот при наличии в разрезе вертикальной горной выработки типа «ствол». Диаметр выработки меньше диаметра первой зоны Френеля в 17-23 раза и длины волны в 5-6 раз. Отклик этого объекта не наблюдается на временном разрезе, но наблюдается в спектральных характеристиках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кондратьев О.К. Разрешающая способность сейсморазведки МОВ-ОГТ // Геофизика. – 2006. – № 2. – С. 3-12.
2. Спасский Б.А., Герасимова И.Ю. Сейсмостратиграфия: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2007. – 245 с.: ил.
3. Semerikova I.I. Studying of wave processes in a rock mass by technique for recognizing fractured zones in fields of seismic waves // Geomodel 2017 – 19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. – Gelendzhik, 2017. – код 135105 – DOI: 10.3997/2214-4609.201702274.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2019.4.20

МЕЖСКВАЖИННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА АВАРИЙНОМ УЧАСТКЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

А.В. ЧУГАЕВ*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

Аннотация: Скважинные сейсмические исследования, проведенные на аварийном участке рудника СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей позволяют расширить представление о состоянии изучаемого массива за счет увеличения частоты сейсмического сигнала и, соответственно, разрешающей способности, по сравнению с наземными сейсморазведочными методиками.

Даны методические рекомендации по параметрам систем расстановки и границам применения межскважинного сейсмического просвечивания на данном объекте. Сделан ряд интерпретационных заключений, которые согласуются с результатами наземных сейсмических исследований.

Ключевые слова: сейсмическое межскважинное просвечивание, скважинная сейсморазведка, сейсмомография, Верхнекамское месторождение, амплитудная томография.

Изучение аварийного участка СКРУ-2 ведется с 1995 года, когда произошло разрушение междукамерных целиков на обширной территории, что привело к оседанию вышележащей толщи. С этого момента велся ежегодный мониторинг с помощью назем-

ной малоглубинной сейсморазведки. В 2014-м году произошел прорыв поверхностных вод в выработанное пространство с последующим образованием провала на поверхности. С этого момента сейсморазведочный мониторинг ведется ежемесячно, для контроля развития процессов связанных с провалом, поскольку в 200 м на север находится барьерный целик, отделяющий аварийный рудник СКРУ-2 от действующего рудника СКРУ-1.

При всех достоинствах наземных сейсмических исследований они имеют известные ограничения по разрешающей способности связанные с распространением сигнала через низкоскоростную толщу приповерхностных отложений. Для более детального изучения водозащитной толщи, предложено применять скважинные сейсмические методики, в частности межскважинное акустическое просвечивание (МАП) и вертикальное сейсмопрофилирование (ВСП). Данная статья посвящена методике выполнения межскважинного просвечивания, и результатам, полученным в 2018 году.

Межскважинные сейсмические исследования выполняются с целью определения внутреннего строения массива и получения его скоростной характеристики путем возбуждения упругих сейсмических волн в одной скважине и приема в другой [1]. На основании времени прохождения волны через массив от одной скважины к другой, зная положение скважин в пространстве, вычисляются значения скорости в массиве, через который распространяется сейсмическая волна. Многолучевое просвечивание позволяет с помощью математического аппарата томографии восстановить распределение скоростной характеристики в массиве.

Аппаратный комплекс состоит из скважинного электроискрового излучателя упругих волн, гидрофонного 24-х канального приемника, и сейсмического регистратора. Возбуждение осуществляется скважинным электроискровым источником в водонаполненной части скважины. Прием осуществляется гидрофонной косой с датчиками пьезокерамического типа, регистрирующими объемное сжатие.

Скважинный источник разработан для возбуждения сейсмических импульсов в водонаполненных скважинах [2]. Энергия импульса 1800-2500 Дж. Разряд происходит в контейнере, заполненном электролитической жидкостью. Время разряда конденсаторов - 500 мкс, что позволяет ожидать частоты генерируемого сигнала не менее 2кГц.

Сбор сейсморазведочных данных осуществляется разработанным для регистрации высокочастотных сигналов сейсмоакустическим регистратором "IS-128". На исследуемом участке регистрация сейсмических данных осуществлялась с использованием 24 активных каналов, шаг дискретизации - 0.2 мс, длина записи 1500 дискрет.

Межскважинное просвечивание реализовано в модификации полного лучевого покрытия, когда запись осуществляется для всех возможных пар источников и приемников в двух скважинах. Запись ведется путем последовательного перемещения источника по всей длине водонаполненной части излучающей скважины с фиксированным положением приемной косы. При одном положении приемной косы отрабатываются все возможные пункты возбуждения, после чего коса смещается на длину расстановки и пункты возбуждения отрабатываются заново. Шаг между пунктами возбуждения кратен шагу между приемниками и равен 1 или 5 м для разных просвечиваний. Смещение приемной линии составляет 24 м.

Регистрируемое волновое поле содержит прямые, отраженные и преломленные волны, а также промышленные и нерегулярные шумы. В качестве полезного сигнала рассматриваются прямые волны продольного типа. Частотный диапазон регистрируемого сигнала составляет от 100 до 350 Гц.

Цифровая обработка сейсмических материалов и снятие времен первых вступлений выполнены в программном комплексе RadExPro [3], расчет томографии – в пакете XТomo [4].

Предварительная обработка полевых сейсмограмм межскважинного просвечивания включала присвоение заголовков трасс на основании геометрии расположения источников и приемников с учетом альтитуды устья скважины, полосовую и режекторную фильтрацию в частотной области для устранения низкочастотных и техногенных помех, а так же веерную фильтрацию в пространственно-временной области для выделения полезного сигнала и подавления регулярных волн, относимых к помехам.

Для исключения ошибок связанных с неправильной идентификацией регистрируемых волн на основании априорной информации о скоростных свойствах массива выполнено моделирование проходящей волны, и рассчитаны синтетические значения времен первых вступлений. Эти времена накладывались на наблюдаемые сейсмограммы, и с учетом этого моделирования выполнялось снятие первых вступлений прямой проходящей волны.

Пример сейсмограммы прямого просвечивания (вертикальное смещение ПП-ПВ равно 0), с нанесенными временами первых вступлений приведен на рисунке 1. На основании времен первых вступлений, полученных по данным прямого просвечивания, построены априорные скоростные модели, которые приняты в качестве нулевого приближения при выполнении томографической инверсии.

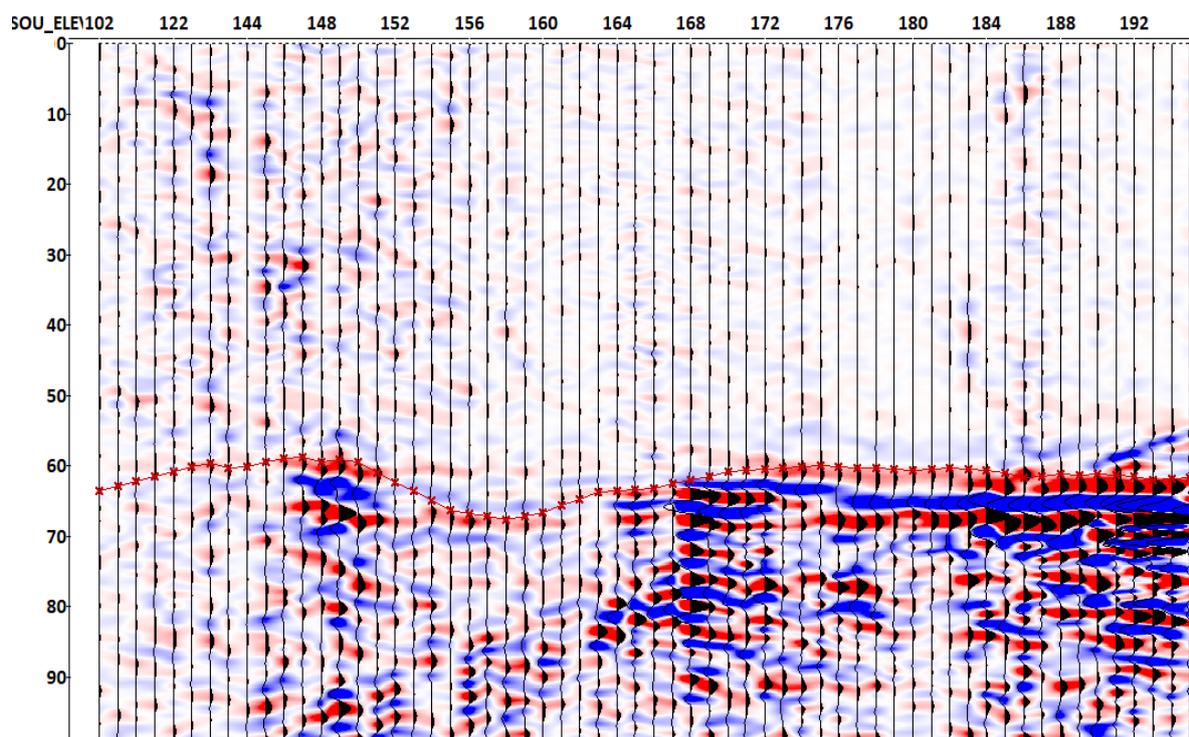


Рис. 1. Сейсмограмма прямого просвечивания

Полученные первые вступления являются исходными данными для выполнения сеймотомографического расчета. Основным результатом томографической инверсии является скоростное распределение в плоскости между скважинами. Кроме того, может быть построена карта распределения лучевой плотности, которая необходима для уточнения области наличия волнового поля.

Томографическая инверсия выполнена с помощью программного пакета X-Tomo LM 3.2. Обратная кинематическая задача томографии решается путем подбора модели среды по критерию минимальности невязок между наблюдаемыми и расчетными временами пробега волн, основной инструмент подбора – программные средства моделирования [4]. Для преодоления некорректности обратной задачи томографии в алгоритме реализован способ регуляризации, который позволяет получить физически и геологически адекватное решение. Шаг сетки модели выбран равным 2 м по горизонтали и по вертикали.

Для подбора подходящих параметров регуляризации и точности решения необходимо оценить разрешающую способность метода. Согласно [5, 6] минимальный размер аномалии B , которая может быть выделена с помощью двухсторонней расстановки, ограничен размером зоны Френеля для проходящих лучей:

$$B \geq R_f = \frac{1}{2} \sqrt{L\lambda},$$

где λ – длина проходящей волны, которая может быть найдена как V/f – отношение средней фазовой скорости волн по лучу, к центральной частоте зарегистрированного сигнала. При расстоянии между скважинами от 150 до 250 м и значениях центральной частоты зарегистрированных сигналов от 120 до 350 Гц, R_f будет изменяться от 18 до 25 м. Таким образом, можно принять указанные значения R_f в качестве предела разрешающей способности методики в указанных условиях. Наибольшей разрешённостью будет характеризоваться просвечивание с наименьшим расстоянием между скважинами.

Результаты томографической инверсии по трем просвечиваниям представлены на рис. 3а в виде единого профиля по ломаной линии проекции.

На этом участке также проведены наземные сейсмические исследования. В частности, в непосредственной близости проходит наземный малоглубинный сейсморазведочный профиль, отработанный в декабре 2018 г (рис. 2б,в).

Разрез по скважинам представлен в глубинном масштабе абсолютных отметок от +80 до -10 м и соответствует на малоглубинных разрезах временам от 60 до 130 мс, то есть, охватывает нижнюю часть терригенно-карбонатной толщи и почти весь интервал соляно-мергельной толщи. По абсолютным значениям скоростей выделяется участок между скважинами 1 и 2 ниже абсолютной отметки +10 м. На малоглубинном скоростном разрезе так же имеется локальное понижение скоростей на соответствующих временах и пикетах 550-650. Однако в целом участок между скважинами 1 и 2 характеризуется слабой дифференциацией пластов по скорости, оси синфазности выдержаны, резких изменений скорости не наблюдается. Наиболее контрастные вариации скоростей наблюдаются в центральной части участка, в частности в районе скважины 3. Это может быть связано с формированием гидрогеологического канала с юго-востока на северо-запад что, так же подтверждается другими наблюдениями на данном участке. На участке скв. 3 – скв. 4 выделяется прогиб синклинали вида, присутствующий на скоростной характеристике по данным томографии и на временном разрезе.

При проведении межскважинного просвечивания на аварийном участке рудника СКРУ-2 на сейсмограммах просвечивания наблюдается эффект значительного затухания сигнала на отдельных участках записи. При положениях пунктов взрыва и пунктов приема в одной полуплоскости (в данном случае выше глубины 148 м от устья скважины или ниже 160 м), регистрируется четко прослеживаемый синфазный сигнал (рис. 3). При расположении ПВ и ПП в разных полуплоскостях, наблюдается эффект значительного затухания сигнала.

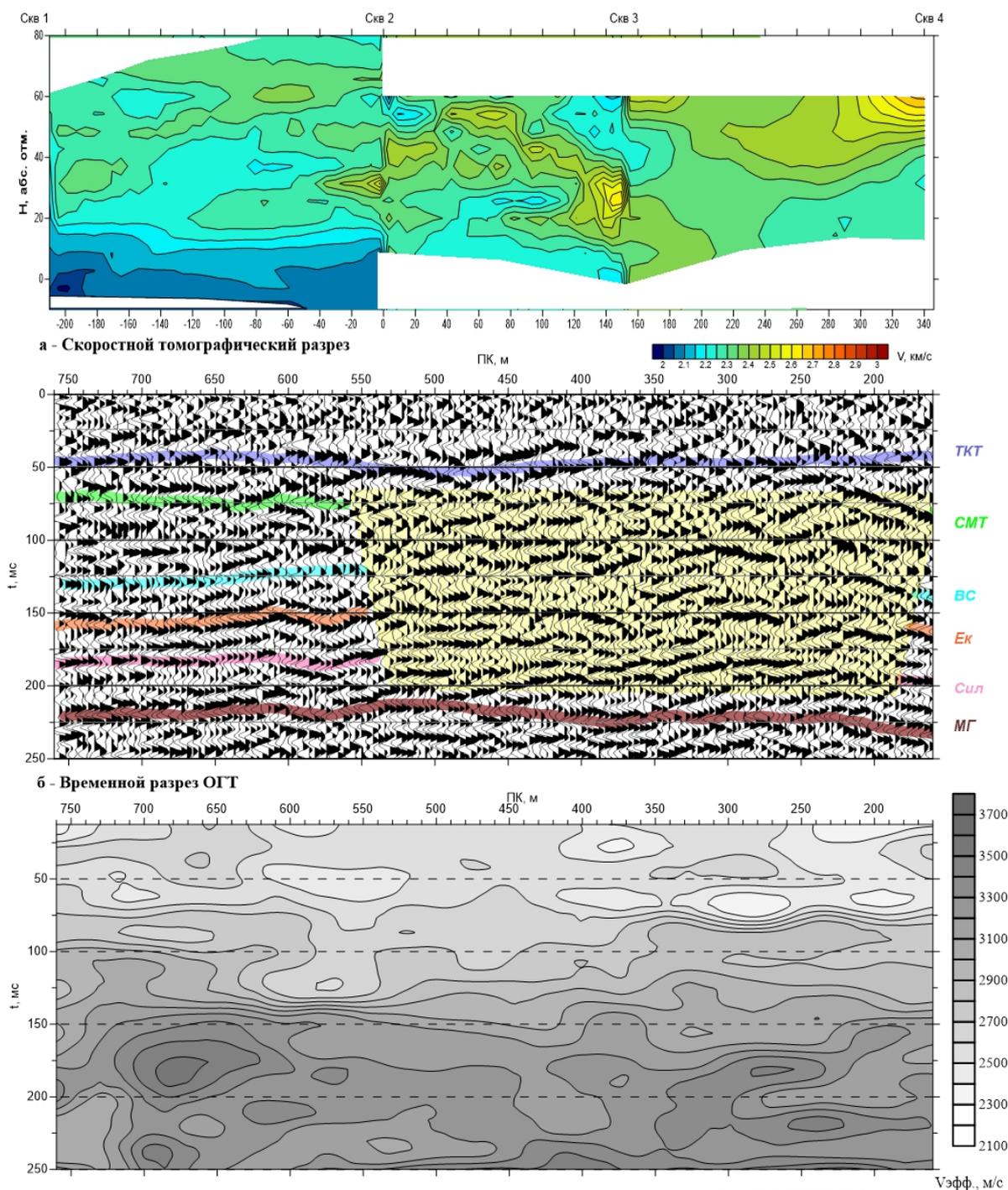
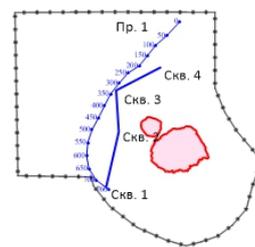


Рис. 2. а) Скоростной разрез по данным томографии по просвечиваниям скв 1 – скв 2, скв 2 – скв 3, скв 3 – скв 4, б) временной разрез ОГТ по профилю Пр 1, в) скоростная характеристика временного разреза Пр 1



Кроме того, на всех необработанных сейсмограммах в районе глубины 165 м наблюдается эффект «шумящего пласта» - волна с линейными осями синфазности, расходящимися вверх и вниз по скважине (рис. 4). Кажущаяся скорость данной волны – 800 м/с вниз и 750 м/с вверх, частоты от 150 до 350 Гц.

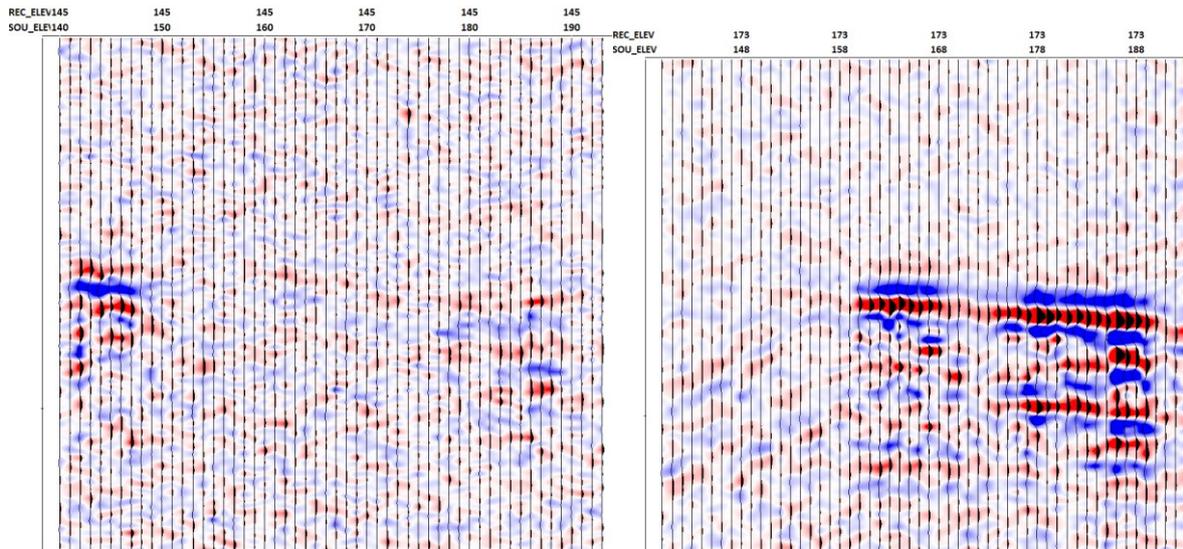


Рис. 3. Сейсмограммы прямого просвечивания. $Z_{ПВ} = 140-193$. а) $Z_{ПП} = 145$ м, б) $Z_{ПП} = 173$ м.

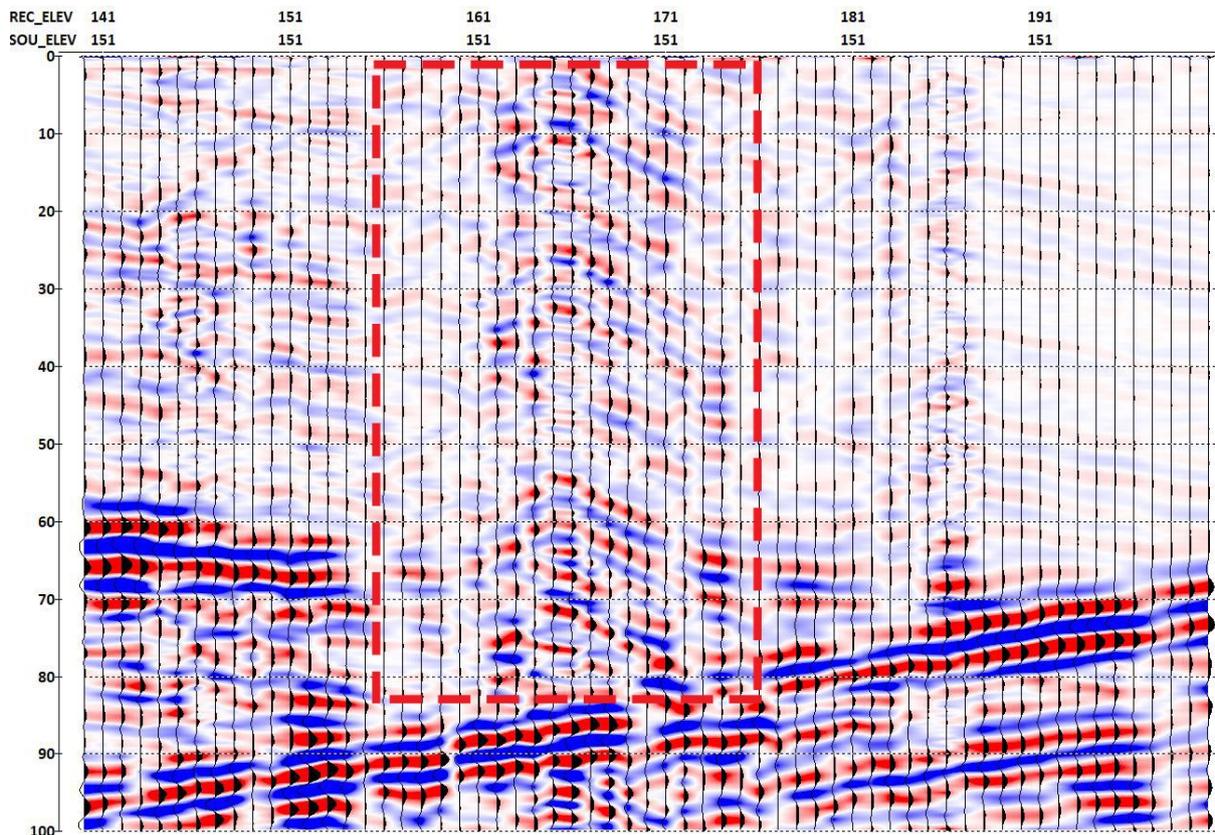


Рис. 4. Сейсмограмма межскважинного просвечивания с «шумящим пластом»

Согласно литологической колонке, полученной в скважине, которая расположена в 30 м к западу от плоскости просвечивания, на глубине 160 м залегает пропласток гипса, мощностью 0.85 м. Скорость продольных волн в гипсе (5000 м/с и более) существенно выше, чем во вмещающих породах, представленных мергелями с примесью глины (2000-2300 м/с), что обуславливает наличие сейсмической границы с высокой акустической жесткостью. Мощность пласта на порядок меньше разрешающей способности всех сейсмических методов, которые направлены на изучение данного интервала глу-

бин, поэтому напрямую выделить этот пропласток невозможно. Однако по косвенным признакам можно проследить его наличие в разрезе.

По прослеженным первым вступлениям рассчитана энергия сигнала прямой волны и построено распределение в зависимости от положений пунктов возбуждения и приема (рис. 5).

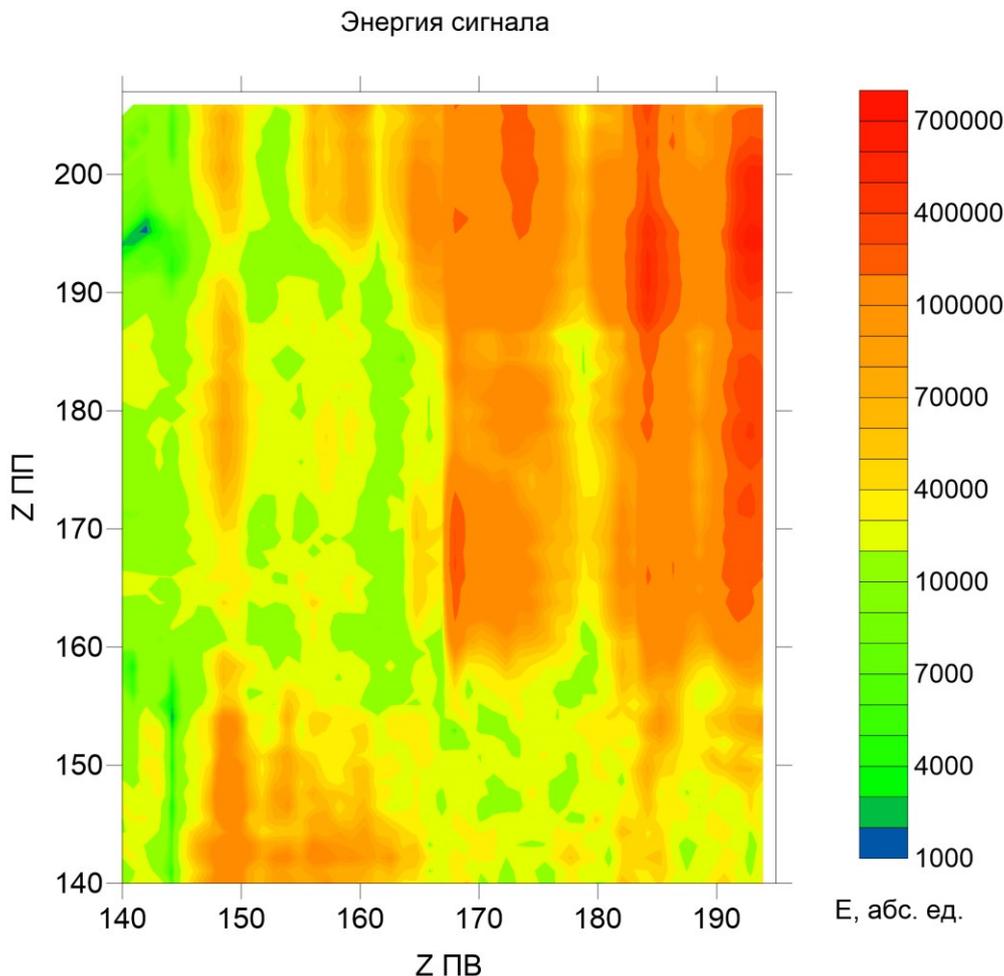


Рис. 5. Распределение энергии сигнала в зависимости от положения источников и приемников

На этом распределении выделяются две прямоугольных области с высокими значениями энергии сигнала, ограниченные линиями $Z_{ПП} = 160$ м и $Z_{ПВ} = 162$ м. Кроме того, небольшое понижение энергии прямой волны наблюдается по линии $Z_{ПВ} = 180$ м и $Z_{ПП} = 185$ м.

В процессе расчета сейсмотомографии помимо распределения скорости строится модель лучевого покрытия (рис. 6б) – для каждой пары источник – приемник строится траектория распространения луча.

Зная положения лучей прямой волны в пространстве и значения амплитуд, можно выполнить амплитудную инверсию (амплитудную томографию). Суть инверсии заключается в том, что луч разбивается на конечные элементы и каждому отрезку луча присваивается свой коэффициент ослабления сигнала. Имея массив лучей, каждый из которых характеризуется значением амплитуды и траекторией, вычисленной на основании кинематической инверсии, можно получить распределение коэффициентов ослабления сигнала (или обратной величиной – коэффициентом добротности) по разрезу между скважинами.

Инверсия выполнена в программном пакете Zond2ST (trial version) [7], построен разрез добротности Q между скважинами. Результаты приведены на рисунке 7.

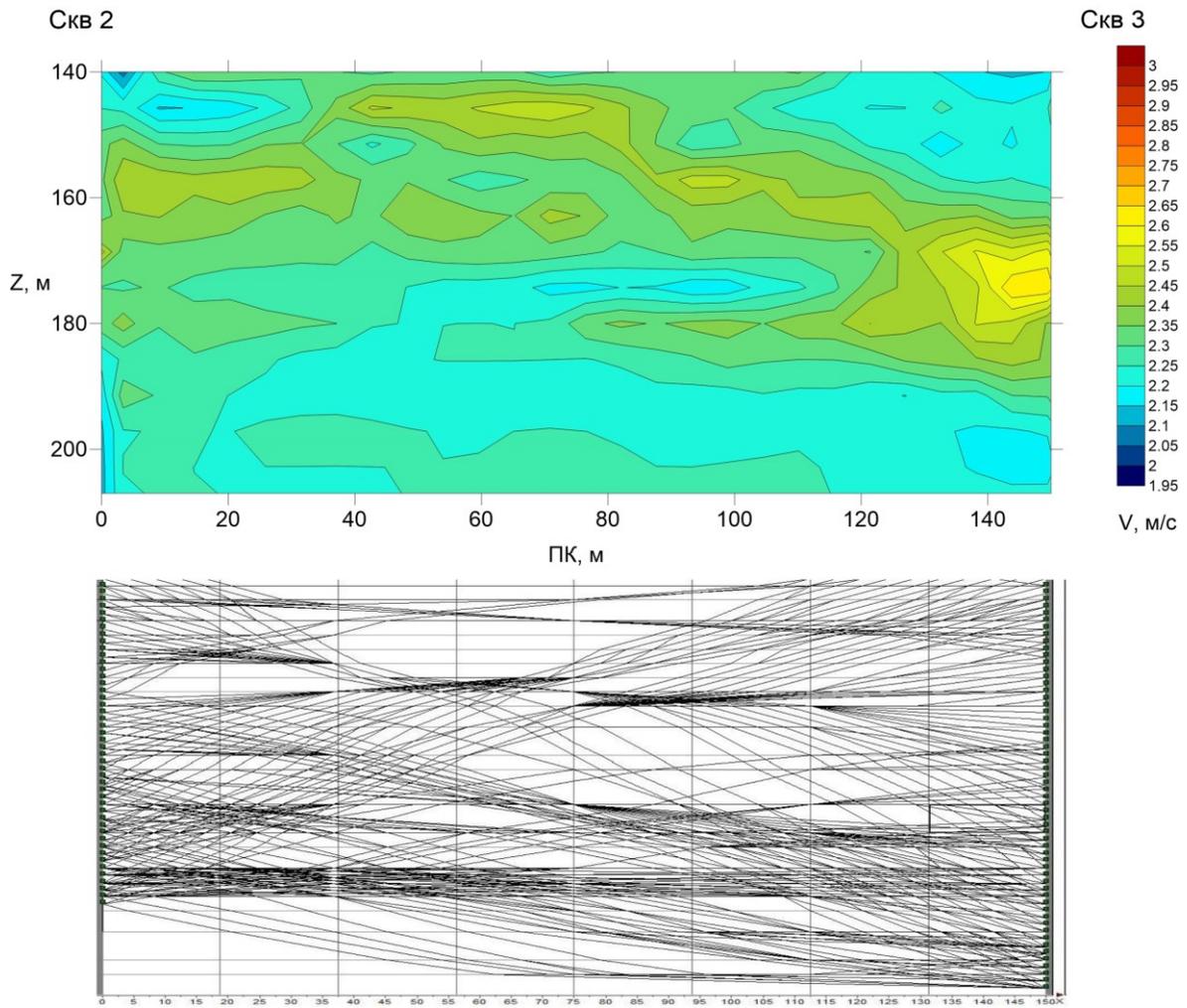


Рис. 6. а) Скоростное распределение между скважинами, б) лучевое покрытие

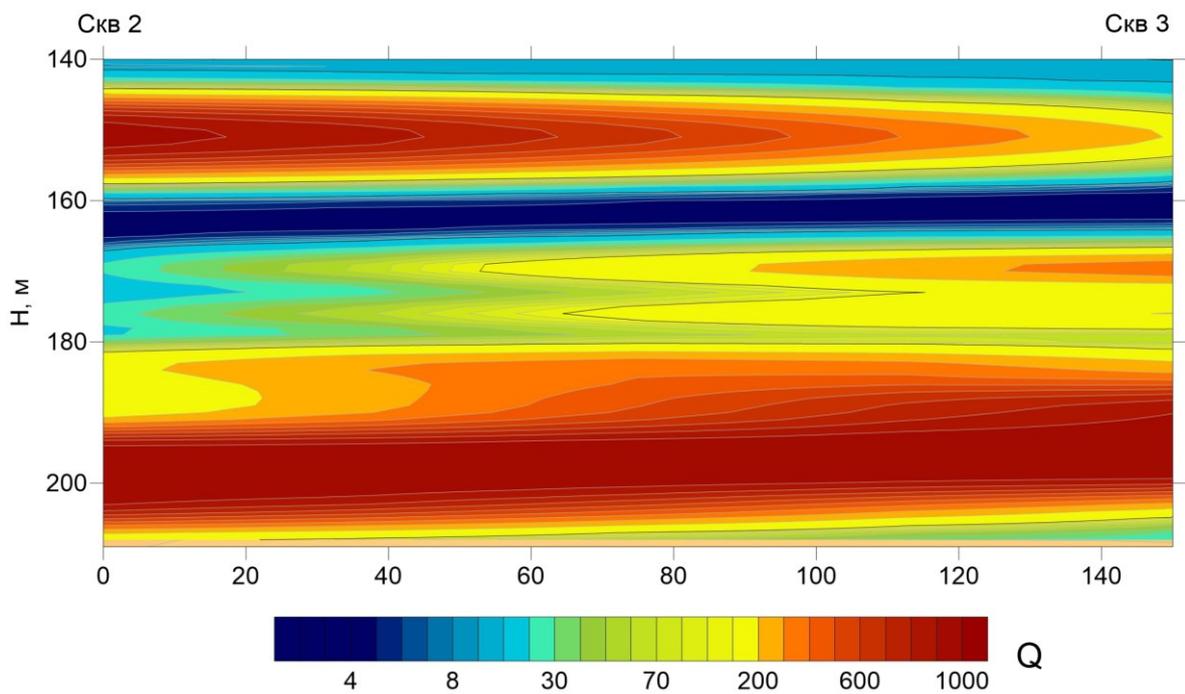


Рис. 7. Распределение добротности по данным амплитудной инверсии

На разрезе добротности выделяются два пласта с высоким затуханием сигнала – один на глубинах 158-165 м, второй на глубине 180 м. На скоростном разрезе интервал 158-165 м характеризуется повышенными значениями скоростей продольных волн. Поскольку пласт залегает горизонтально, лучи в подавляющем большинстве случаев подходят к данному пласту под критическими и закритическими углами, в результате чего он работает как отражающий экран, который ослабляет энергию проходящих волн на несколько порядков. Таким образом, можно говорить, что тонкий пласт гипса отображается в волновом поле, зарегистрированном при межскважинном просвечивании.

Помимо мощного ослабления сигнала за счет гипсового пласта, на распределении добротности выделяется зона пониженных значений в интервале пикетов 0-60 м на глубине 165-180 м. Это понижение амплитуд может быть вызвано ослабленными прочностными свойствами массива или повышенной трещиноватостью на этом участке. Высказанное предположение подтверждается данными наземной сейсморазведки на данном участке (рис 2б,в), в частности, наблюдается уменьшение скоростей по данным скоростного анализа и аномальный характер волнового поля в методике ОГТ.

Выводы

По результатам межскважинного просвечивания сделаны следующие выводы:

1. Применение просвечивания в сейсмогеологических условиях аварийного участка в скважинах, расположенных на расстоянии от 150 до 250 м позволяет выделять неоднородности с поперечными размерами от 18 до 25 м. На больших расстояниях проведение межскважинного просвечивания малоинформативно в связи с сильным затуханием сейсмического сигнала.

2. Рекомендуемый шаг пунктов взрыва и пунктов приема для данного участка, характеризующегося высоким уровнем акустического и сейсмического шума, составляет не более 2 м.

3. В районе скважины 2 по комплексу методов в надсолевом интервале выделяется зона, ориентированная с юго-востока на северо-запад, предположительно связанная с формированием гидрогеологического канала в этом направлении.

4. Амплитудный анализ на основе томографии позволяет выделять пласты малой мощности (на порядок меньше длины волны) но высокой акустической жесткости, и открывает перспективы применения данного подхода при поиске зон повышенной трещиноватости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Чугаев А.В., Ладейщиков С.В. Новые методические решения малоуглубинной сейсморазведки на месторождениях водорастворимых полезных ископаемых // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 17-22.
2. Санфиоров И.А., Чугаев А.В., Бабкин А.И., Лисин В.П., Бобров В.Ю. Горнотехнические приложения малоуглубинной скважинной сейсморазведки // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 24-30.
3. RadExPro – 2018: руководство пользователя. – М., 2018. – Текст электронный // URL: <http://radexpro.com/ru/> (Дата обращения 15.04.2019)
4. Болгаров А.Г., Рослов Ю.В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач // Технологии сейсморазведки. – 2009. – №1. – С. 105-111.
5. Nolet G. A Breviary of seismic tomography. – Cambridge Univ. Press, 2008. – 344 p. – Текст электронный // URL: <https://doi.org/10.1017/SVO9780511984709>. (Дата обращения 15.04.2019)
6. Шишкина М.А., Фокин И.В., Тихоцкий С.А. К вопросу о разрешающей способности межскважинной лучевой сейсмической томографии // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 5-21.
7. Zond 2ST – 2018: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – М., 2018. – Текст электронный // URL: <http://zond-geo.com/> (Дата обращения 15.04.2019).