

УДК 550.834:550.832.04

СЕЙСМОРАЗВЕДКА НА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛНАХ ПРИ МЕЖСКВАЖИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

А.В. Чугаев, И.А. Санфиоров, М.В. Тарантин

Горный институт УрО РАН, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а, Россия

Предложена методика получения глубинного сейсмического разреза путем углубленной обработки данных межскважинного просвечивания. На основании анализа волнового поля и сейсмогеологического моделирования разработан граф обработки данных межскважинного просвечивания для выделения поля отраженных волн в условиях присутствия границы резкого изменения скорости упругих волн. Миграция поля отраженных волн из временного масштаба в глубинный выполняется с помощью решения прямой задачи для каждой пары источник—приемник.

В результате вычисляется положение точек отражения, после чего все трассы суммируются на базе сетки биинирования. Входной информацией для выполнения миграции и решения прямой задачи является скоростная характеристика массива, которая рассчитывается с помощью томографии на прямых проходящих волнах, полученных из того же набора данных межскважинного просвечивания и вертикального сейсмопрофилирования. Результирующий глубинный сейсмический разрез имеет разрешающую способность на порядок выше, чем при вертикальном сейсмопрофилировании и наземных мало-глубинных исследованиях, что открывает возможности выделения различных малоразмерных объектов природного и техногенного генезиса в межскважинном пространстве.

Скважинная сейсморазведка, межскважинное просвечивание, глубинный сейсмический разрез, общая глубинная точка, межскважинная томография, миграция отраженных волн

CROSS-WELL REFLECTION IMAGING AT THE VERKHNEKAMSKOE POTASSIUM SALT DEPOSIT

A.V. Chugaev, I.A. Sanfirov, M.V. Tarantin

We propose a technique for the extended processing of cross-well seismic data for reflection imaging. Based on the analysis of the wave field and synthetic modeling, a graph for processing cross-well data is developed to separate the reflections in the presence of the boundary of a sharp change in the velocity of elastic waves. The migration of the reflection waves from the time scale to the depth one is performed by solving a forward problem for each source–receiver pair. As a result, the position of the reflection points is calculated, after which all traces are stacked based on the binning grid. The input information for performing the migration and solving a forward problem is the velocity characteristic of the massif, which is calculated using traveltimes tomography on direct body waves obtained from the same data set of cross-well survey and vertical seismic profiling. The resulted depth seismic section has a much higher resolution than that of vertical seismic profiling and ground-based shallow seismic studies. This opens up the possibility of identifying various small-sized natural or technogenic objects in the interwell space. Practical implementation was carried out at the Verkhnekamskoe potassium salt deposit.

Seismic well survey, cross-well seismic survey, depth seismic section, reflected waves, cross-well tomography, common depth point, migration of reflected waves

ВВЕДЕНИЕ

Скважинные исследования представляют особый раздел сейсморазведки, отличающийся получением высокоразрешающих материалов при расположении линии приема или возбуждения в скважине. Подавляющая часть выполняемых работ промысловой и рудной скважинной сейсморазведки представлена вертикальным сейсмическим профилированием (ВСП). Создание и развитие метода ВСП осуществлялось школой советских и российских ученых под руководством Е.И. Гальперина и имеет обширную теоретическую базу. Однако в данных работах тема межскважинного сейсмического просвечивания (МСП), когда источники и приемники находятся в соседних скважинах, осталась нераскрытой. В то же время этот метод исследований может качественно изменить возможности скважинной сейсморазведки при поиске и разработке месторождений полезных ископаемых, а также при инженерно-геологических изысканиях. Непосредственная близость к объекту исследований позволяет выделять детальные особен-

ности строения геологической среды. Частотный диапазон регистрируемых сигналов при межскважинных исследованиях существенно шире, чем в материалах наземной сейсморазведки и ВСП.

В настоящее время широкое распространение получил метод МСП на прямых проходящих волнах [Ошкин и др., 2016; Lebedev, Dorokhin, 2019]. Такой подход учитывает лишь первые вступления проходящих волн, при этом последующая запись не анализируется. Стоит отметить, что бурное развитие сейсморазведки в 60-х годах XX в. произошло именно благодаря внедрению метода отраженных волн и методики многократных перекрытий с максимально полным анализом записи волнового сигнала. Отраженные волны в сейсморазведке, без сомнения, играют ключевую роль. Поэтому без их использования развитие скважинной сейсморазведки, на наш взгляд, невозможно.

Важным аспектом при обработке данных в МСП является наличие в зарегистрированном волновом поле отражений как из нижнего (относительно линии источник—приемник), так и из верхнего полупространства, что, с одной стороны, усложняет процесс обработки, а с другой, — повышает интерпретационные возможности.

В настоящей статье рассматриваются принципы выделения отраженных волн, присутствующих на сейсмических записях межскважинного просвечивания, и получения с их помощью изображения геологической среды при наличии в ней границы с резким изменением скоростей упругих волн. Практическое опробование представленных теоретических разработок выполнено в сейсмогеологических условиях Соликамской впадины Предуральяского краевого прогиба на территории крупнейшего в Европе Верхнекамского месторождения калийных солей.

С помощью данного подхода возможен поиск и картирование малоразмерных неоднородностей, указывающих на особенности геологического строения надсоляной и водозащитной толщ. Такие неоднородности могут играть существенную роль в развитии негативных техногенных геологических процессов при подземной разработке месторождения.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Впервые получение сейсмического изображения с помощью отраженных волн при межскважинных исследованиях предложено в статье [Baker, Harris, 1984]. Решение основывается на трансформации ВСП-ОГТ. Дальнейшее развитие данного направления по большей части выполнялось преимущественно этими же авторами в серии статей [Smalley, Harris, 1992; Harris et al., 1992; Van Schaack et al., 1992; Rector et al., 1992; Lazaratos et al., 1992; Li, Stewart, 1994; Matsushima et al., 1997]. В работах выполнено моделирование волнового поля межскважинных наблюдений [Van Schaak et al., 1992], рассмотрены принципы получения сейсмических записей, получение скоростного разреза с помощью сейсмической томографии, выделение поля отраженных волн [Rector et al., 1992], его миграции и суммирования по общей глубинной точке [Lazaratos et al., 1992]. В результате показана возможность получения высокоразрешающих сейсмических разрезов межскважинного пространства. Примеры успешного применения данного подхода описаны в работах нефтегазовой [Yu et al., 2002, 2003; Antonelli et al., 2004; Wong, Stewart, 2007] и рудной [Khalil et al., 1993; Findly et al., 2007; Menu et al., 2013; Menu, 2018] направленности. Важные результаты получены в работе, посвященной двухступенчатой миграции, позволяющей учесть дифракционные эффекты, связанные с нелинейным поведением отражающих границ [Byun et al., 2002]. С помощью современных средств полноволнового моделирования получены высокоразрешающие синтетические записи, позволяющие провести всесторонний анализ волновой картины [Raji et al., 2017].

Во всех представленных работах скоростной разрез достаточно однородный, максимальное изменение скоростей не превышает 25 %, как, например, в [Harris et al., 1992].

На месторождениях солей очень часто на границе, соответствующей кровле соляной толщи, скорость возрастает скачкообразно. Значения скоростей могут отличаться в 1.5—2.0 раза. Так, на Верхнекамском месторождении скорость продольных волн в покровной каменной соли составляет 4400—4600 м/с, а в вышележащих терригенных породах 2000—2400 м/с. В настоящей статье рассматриваются особенности межскважинного просвечивания в условиях наличия высококонтрастной акустической границы, которые необходимо учитывать при обработке материалов МСП для построения глубинного сейсмического разреза.

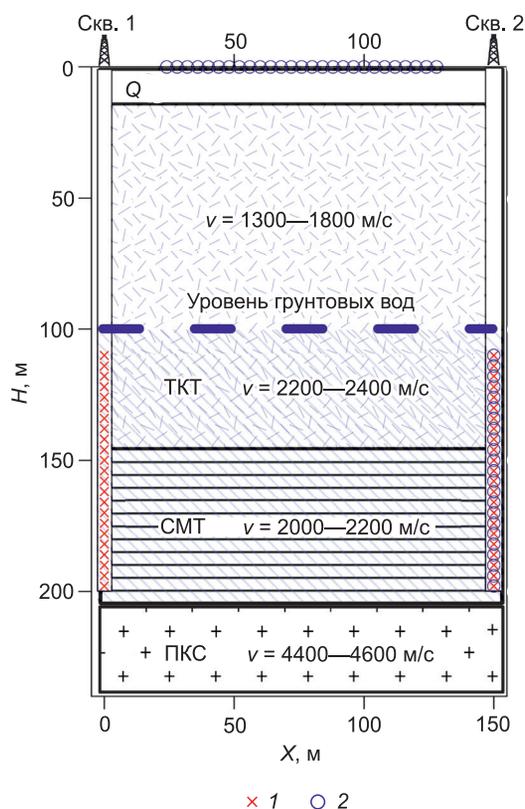
ПОЛУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Описываемые сейсмические материалы получены в гидронаблюдательных скважинах, пробуренных на аварийном участке шахтного поля действующего калийного рудника. Скважины обсажены пластиковой колонной (ПВХ), частично водонаполненные, уровень воды в скважине соответствует уровню грунтовых вод и расположен на глубине 100 м от поверхности. Такой низкий уровень обусловлен осушением территории для целей ликвидации аварии и предотвращения полного затопления выработанного шахтного пространства.

Рис. 1. Сейсмогеологическая модель среды и система наблюдений.

1 — пункт возбуждения, 2 — пункт приема. ТКТ, СМТ, ПКС — пояснения см. в тексте.

Система наблюдений первоначально спроектирована для выполнения работ по методу МСП на прямых проходящих волнах, однако углубленная обработка позволила из того же набора данных извлекать дополнительную информацию об акустических свойствах среды. Возбуждение выполняется в скв. 1 с помощью электроискрового источника [Калинин и др., 1989; Владов, 2003] с энергией 2500 Дж. В скв. 2 осуществляется регистрация с помощью 24-канальной пьезоэлектрической гидрофонной косы (рис. 1). При цифровой обработке материалов важным условием является равенство шага пунктов приема и возбуждения. В рассматриваемом примере они равны 1 м. Интервал глубин возбуждения и приема 125—195 м. Помимо скважинной приемной линии регистрация также велась на поверхности по линии, соединяющей устья скважин. Шаг приемников на поверхности составлял 4 м. Таким образом, реализована трехсторонняя расстановка для томографических наблюдений, состоящая из трех наборов данных: непродольного ВСП в скважинах 1 и 2 и межскважинного просвечивания из скв. 1 в скв. 2.



ОПИСАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ПРИ МЕЖСКВАЖИННОМ ПРОСВЕЧИВАНИИ

Волновое поле, возбуждаемое и регистрируемое во внутренних точках среды, по сравнению с наземными сейсмическими исследованиями имеет существенные отличия. При нормальном залегании границ и отсутствии явного нарушения сплошности массива интенсивность сейсмического сигнала намного выше, а частотный диапазон — шире, чем при наземных исследованиях [Санфиоров и др., 2019, 2020].

Для корректного анализа сейсмического волнового поля необходима информация об основных геологических особенностях изучаемого массива. С одной стороны, разрез является типичным для осадочных горных пород и характеризуется горизонтальной слоистостью с субпараллельным расположением слоев (см. рис. 1). В терригенно-карбонатной (ТКТ) и соляно-мергельной толщах (СМТ) присутствуют высокоскоростные прослои гипса мощностью от нескольких сантиметров до первых метров. Особенной для изучаемого разреза является граница, отделяющая породы терригенного происхождения от соляной залежи. В условиях полного разреза кровля соляной залежи представлена покровной каменной солью (ПКС) со скоростями продольных $v_p \approx 4500$ м/с и поперечных волн $v_s \approx 2500$ м/с. Высокая растворимость галита способствует срезанию мелкой складчатости на верхней границе соляной толщи, в результате чего появляется особый вид контакта, характеризующийся меньшим наклоном и степенью складчатости, чем выше- и нижележащие породы.

С другой стороны, проведение сейсмических работ на изучаемой территории обусловлено предаварийным состоянием рудника, вызванного изначально сложным геологическим строением, а также последующими карстово-суффозионными процессами и мероприятиями по их ликвидации, включающими осушение территории и закачку тампонирующих растворов.

Типичная сейсмограмма межскважинных наблюдений приведена на рис. 2. Наиболее интенсивными являются прямая проходящая волна (A) и отражения от кровли соли (C). Головная волна (B) регистрируется раньше остального волнового поля, что позволяет легко ее идентифицировать. Прохождение этих основных элементов волнового поля через массив генерирует вторичные поля отраженных и обменных волн. Для построения сейсмических разрезов полезным сигналом будут являться отраженные волны P_1P из нижней полуплоскости (C) и P_2P из верхней (D). Данные отражения могут быть обработаны отдельно для получения акустических изображений пространства в виде разреза отраженных волн.

Несмотря на то, что регистрация выполняется датчиками давления в скважинной жидкости, регулярным является присутствие на волновой картине волн, по кинематическим характеристикам соответствующих поперечным волнам (волны K, E, F, J). Регистрация таких волн происходит благодаря обмену

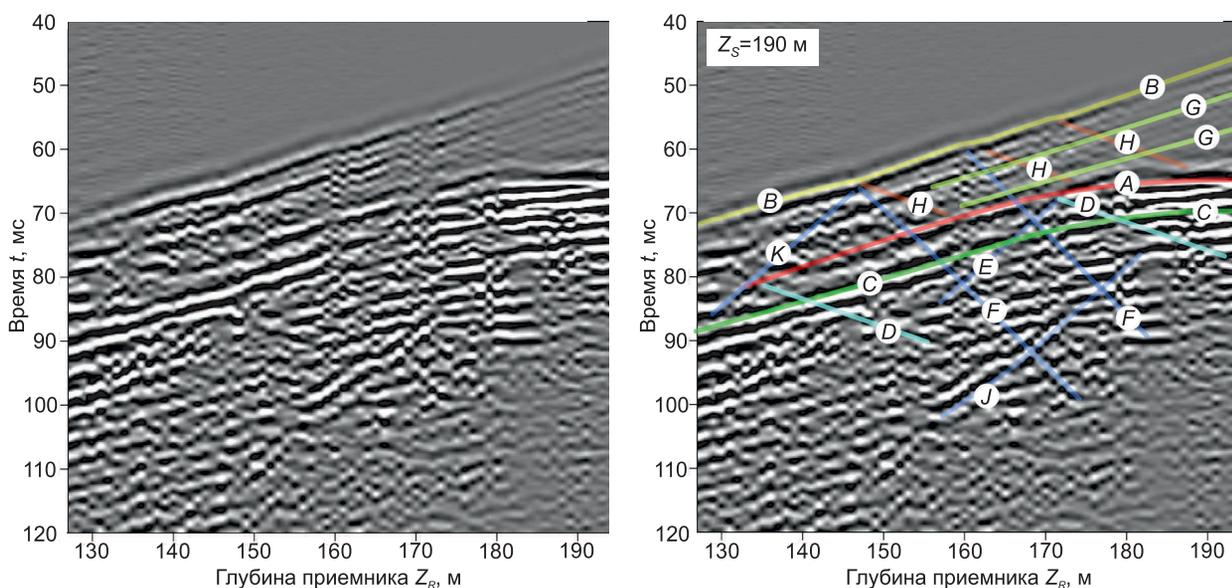


Рис. 2. Сейсмограмма ОПВ межскважинных наблюдений.

Глубина источника $Z_s = 190$ м. *A* — *P* прямая продольная волна, *B* — *PPP* продольная головная волна по кровле солей, *C* — P_1P отраженная волна из нижней полуплоскости, *D* — P_2P отраженная волна из верхней полуплоскости, *E* — *PS* обменная проходящая поперечная волна, *F* — PPP_2S обменное отражение головной волны, *G* — отражения ниже кровли соли, *H* — PPP_2P отражение головной волны, *J* — *SSS* поперечная головная волна, *K* — $PPPS$ обменно-преломленная головная волна.

поперечных волн на стенках скважины, в результате на гидрофоны приходит продольная волна. Поскольку доля времени распространения такой обменной продольной волны в общем пути составляет меньше одной десятой процента, то можно считать, что регистрируется поперечная волна. На данный момент в описываемой методике в качестве полезных принимаются только продольные волны, а рассмотрение поперечных необходимо для их успешного подавления.

Нарушение монотонности времени регистрации отражений при резких перепадах скоростей.

При достаточно больших расстояниях между скважинами резкие различия скоростей приводят к возникновению эффекта нарушения монотонности функции времени отражения от глубины $t(H)$. Когда средняя линия наблюдения ($Z_{CMD} = (Z_s + Z_r)/2$) находится достаточно близко к кровле соли, самым ранним сейсмическим событием является головная волна (*B*), следом за ней регистрируются отражения от границ в соляной толще (*G*), после чего приходят прямая волна (*A*) и отражения в терригенной толще (*C*, *D*).

На рисунке 3 приведена схема сейсмических лучей и кривые зависимости времени прихода отражения от глубины для типичного участка разреза, содержащего кровлю соли. Параметр кривых — расстояние от средней линии наблюдения до кровли соли (H_1). На глубине кровли соли кривая $t(H)$ имеет точку разрыва первого рода.

Отражения от границ внутри соли намного слабее, чем прямая волна и отражения в терригенной толще. Поэтому необходимо определить максимальную глубину в соляной залежи, до которой отражения будут свободны от интерференции с прямой волной. Эту глубину (H_2) можно определить из равенства времени распространения прямой волны и отражения от границы в солях:

$$\frac{L}{v_1} = \frac{2H_1}{v_1 \cos \alpha} + \frac{\sqrt{(L - 2a)^2 + 4H_2^2}}{v_2}. \quad (1)$$

При соотношении скоростей $v_2/v_1 \approx 2$ и угле $\alpha \leq 10^\circ$ можно упростить расчеты и принять $\cos \alpha \approx 1$, $a = H_1 \cdot \text{tg}(\alpha) \approx H_1/10$. Решая уравнение (1) относительно H_2 получим:

$$H_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{v_2}{v_1} (L - 2H_1) \right)^2 - L^2 + \frac{2}{5} LH_1}. \quad (2)$$

Это выражение позволяет рассчитать максимальную глубину отражений в высокоскоростной толще, исходя из скоростной модели, горизонтального расстояния между скважинами L и глубины средней

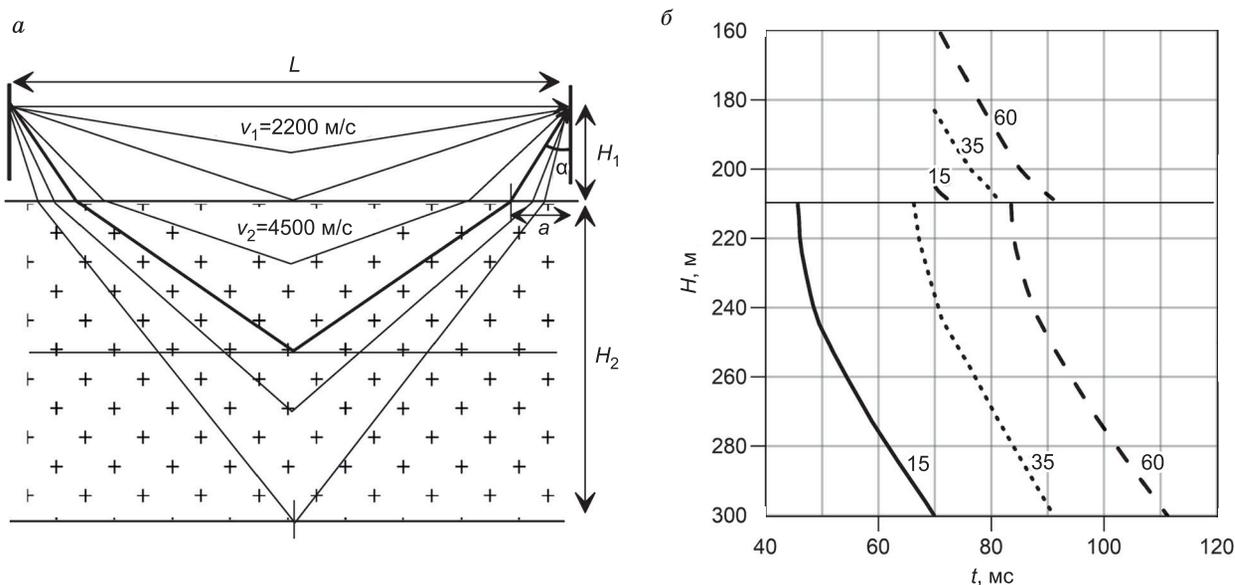


Рис. 3. Схема лучей отраженных волн вблизи резкого скачка скорости (а); кривые зависимостей времени отражения от глубины отражения (параметр кривых — расстояние от средней линии наблюдений до кровли соли) (б).

Кровля соли на глубине 210 м. Пояснения см. в тексте.

линии наблюдений Z_{CMD} . Графически данная зависимость применительно к условиям Верхнекамского месторождения представлена на рис. 4. Параметр кривых — расстояние между скважинами.

Как видно из рисунка, при расстояниях между скважинами 100—250 м, возможно получение отражений от сейсмических границ, расположенных на глубинах 50—200 м ниже кровли соли.

Под кровлю солей уходят лучи с углом падения меньше первого критического i_1 для преломленных волн PPP и второго критического i_2 для преломленных SPP волн. Несмотря на то, что в абсолютном выражении энергия, уходящая ниже кровли соли, невелика и уменьшается с глубиной отражения, этот сигнал не интерферирует ни с какими другими сейсмическими волнами, является регулярным и, следовательно, пригоден для изучения соляной толщи. В абсолютном выражении наибольшее количество энергии, преодолевающей границу кровли солей, образуется при самых нижних положениях средней линии наблюдений.

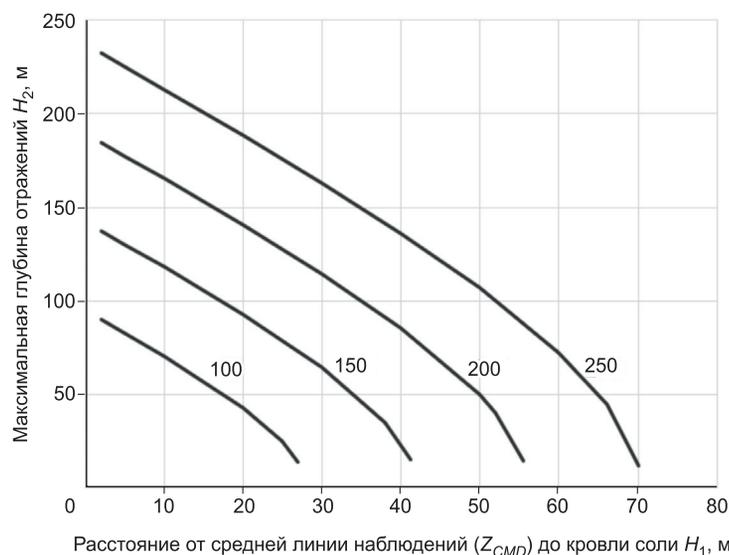


Рис. 4. Максимальная глубина отражений без интерференции с прямой волной.

Параметр кривых — расстояние между скважинами L (м).

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

Высокая сложность волновой картины при межскважинных сейсмических исследованиях выдвигает дополнительные требования к системам наблюдения. Разделение отражений из верхнего и нижнего полупространств возможно только в случае применения симметричной системы расстановки, когда шаги пунктов приема и возбуждения равны. Такой подход делает равноправными сортировки общего пункта возбуждения (ОПВ) и общего пункта приема (ОПП). При этом принцип взаимности позволяет осуществлять симметричную обработку данных МСП. Кроме того, сортировки вертикального удаления ($Offset = Z_R - Z_S$) и общей средней линии наблюдения (CMD — common mid-depth), где $Z_{CMD} = (Z_S + Z_R)/2$, будут иметь минимальный шаг между соседними выборками, что очень важно, поскольку в этих сортировках при проведении цифровой обработки возможно выделение отраженных волн [Li, Stewart, 1994].

Весь набор трасс МСП можно представить в виде трехмерного массива $A(Z_S, Z_R, t)$, как показано на рис. 5. В сортировке Z_{CMD} горизонтальным границам соответствуют горизонтальные годографы отраженных и преломленных волн, т. е. каждая сейсмограмма является однократным временным разрезом.

С целью изучения возможности разделения волновых полей в различных сортировках массива трасс межскважинного просвечивания выполнено моделирование времен первых вступлений прямых, преломленных и отраженных волн из верхнего и нижнего полупространства. Система расстановки и модель среды соответствуют реальным условиям, описанным выше (см. рис. 1).

Результаты моделирования (рис. 6) демонстрируют возможные пути селекции волн. В частности, первые вступления лучше всего могут быть подавлены в сортировке по линии равных удалений с помощью когерентного или медианного фильтра. Отраженные и преломленные волны имеют плоский годограф в сортировке общей средней линии, что позволяет либо выделить, либо подавить их, в зависимости от того, какие волны принимаются в качестве полезных. Разделение восходящих и нисходящих отражений возможно как в сортировке общего пункта возбуждения, так и по линии равных удалений.

Важным этапом является снятие первых вступлений прямой волны, которые необходимы для построения скоростной модели среды с помощью томографии. Первые вступления головной волны, обра-

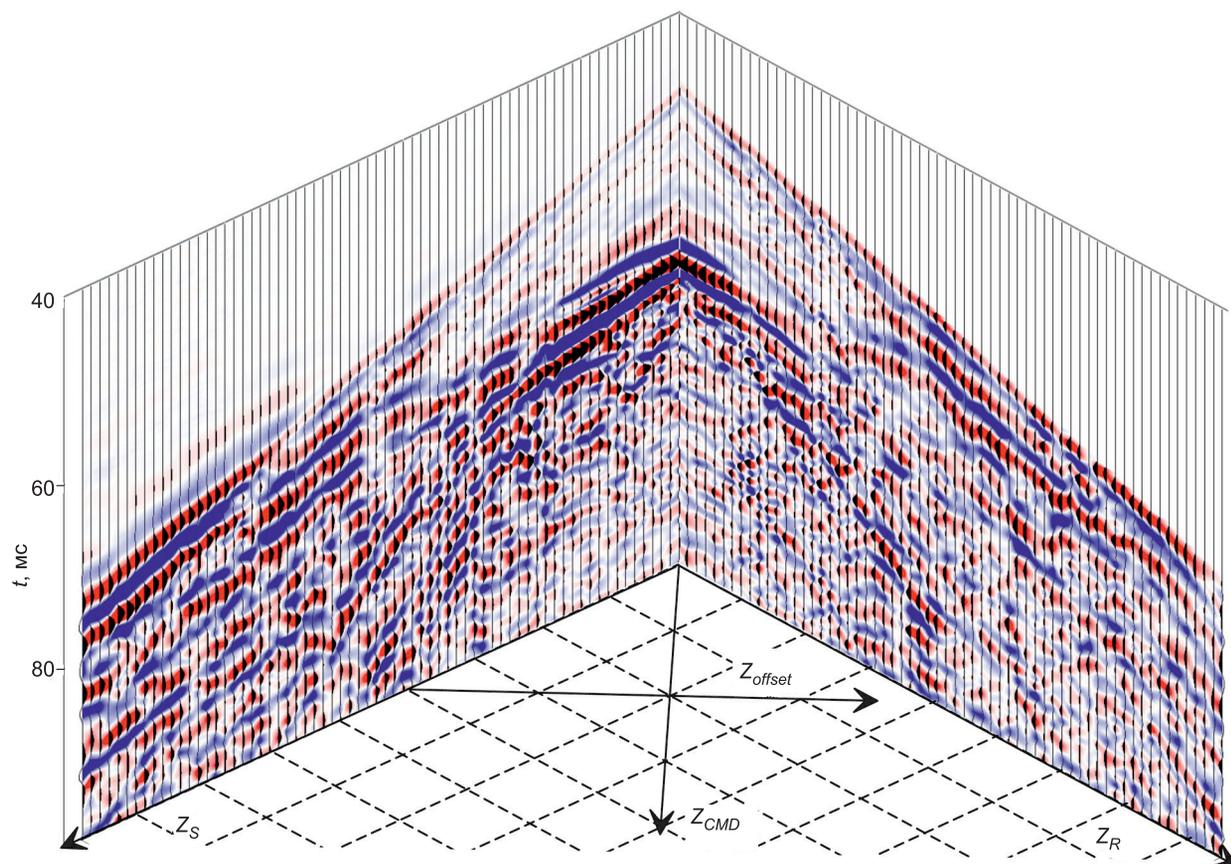


Рис. 5. Трехмерное представление трасс МСП.

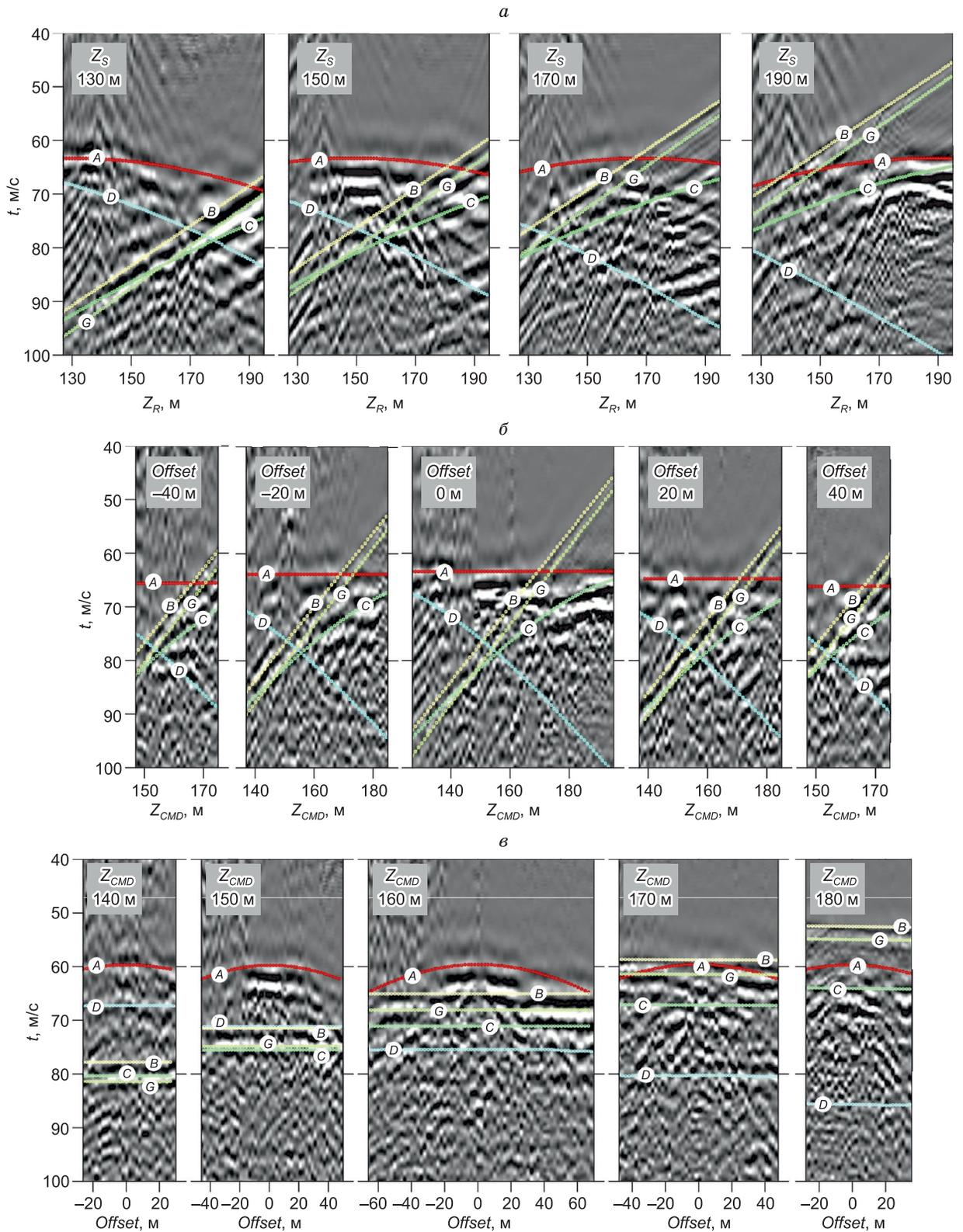


Рис. 6. Результаты моделирования времен регистрации прямых и отраженных волн, нанесенные на реальные сейсмограммы.

a — общий пункт возбуждения, *б* — линия равных удалений (*offset*), *в* — общая средняя линия наблюдений (*CMD*). Обозначения волн соответствуют рис. 2.

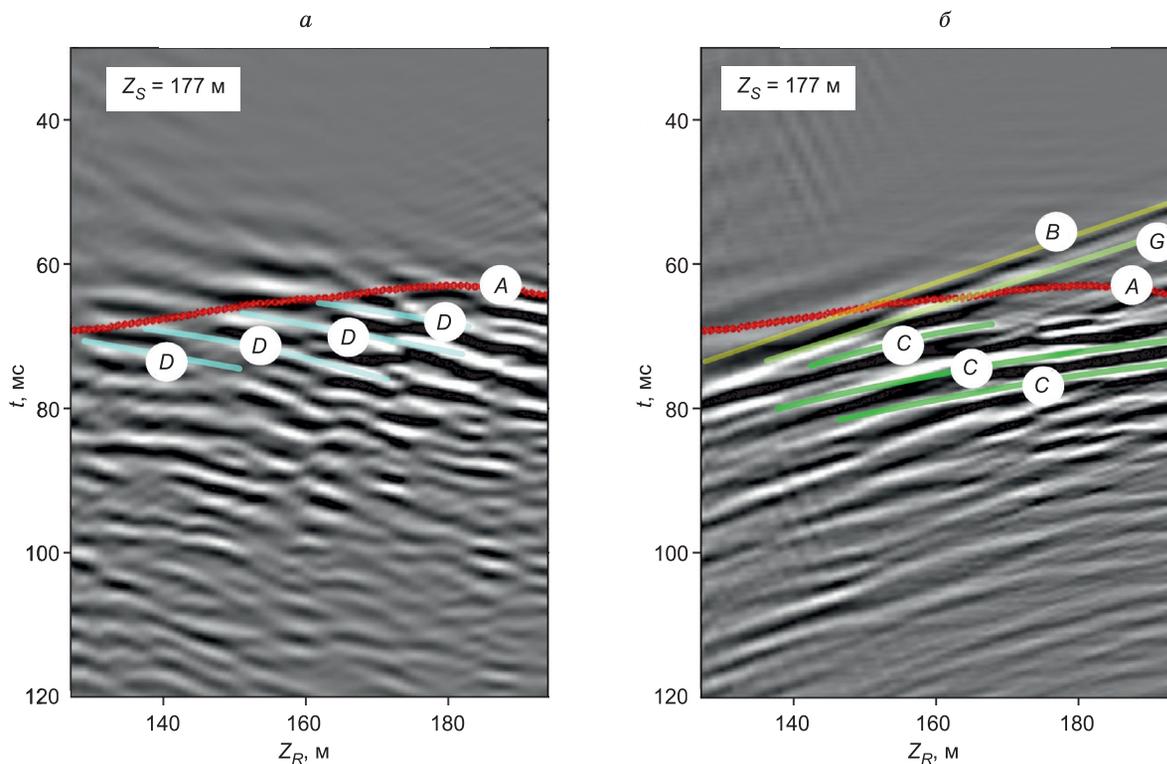


Рис. 7. Итоговые сейсмограммы ОПВ с выделенным полем отраженных волн из верхнего (а) и нижнего (б) полупространств.

зующейся на кровли соли, необходимы для корректного подавления головной волны и вторичного поля преломленно-отраженных волн.

Подавление прямой и кратных волн выполняется в сортировке равных удалений (*offset*). Обменные *S*-волны необходимо подавить в обеих сортировках ОПВ и ОПП. Следующим шагом является разделение отражений из верхней и нижней полуплоскости.

Итоговые сейсмограммы ОПВ с выделенным полем отраженных волн представлены на рис. 7. На сейсмограммы нанесен годограф первых вступлений прямой волны, позволяющий наблюдать точки формирования отражений.

Общая схема получения глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании представлена на рис. 8. Основными этапами являются:

- а — цифровая обработка для выделения поля отраженных волн (из верхней и нижней полуплоскости);
- б — построение скоростной модели среды;
- в — глубинная миграция сейсмограмм;
- г — суммирование и построение глубинного сейсмического разреза.

СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Скоростная модель среды рассчитывается на основании многолучевой томографии комбинированной трехсторонней системы наблюдений межскважинного просвечивания и ВСП в двух скважинах, а также дополнительной априорной информации о выше- и нижележащих пластах. Технология получения скоростного распределения с помощью межскважинной сейсмотомографии детально описана во многих работах [Калинин и др., 2002; Nolet, 2008; Болгаров, Рослов, 2009; Ошкин и др., 2016; Чугаев и др., 2017; Lebedev, Dorokhin, 2019; Владов и др., 2020].

В качестве начальной модели расчета томографии заданы скорости, полученные с помощью ВСП и акустического каротажа. Обратная кинематическая задача томографии решается путем подбора модели среды по критерию минимума невязок между наблюдаемыми и расчетными временами пробега волн, основным инструментом подбора — программные средства моделирования [Болгаров, Рослов, 2009]. Для преодоления некорректности обратной задачи томографии алгоритм использует способ регуляризации,

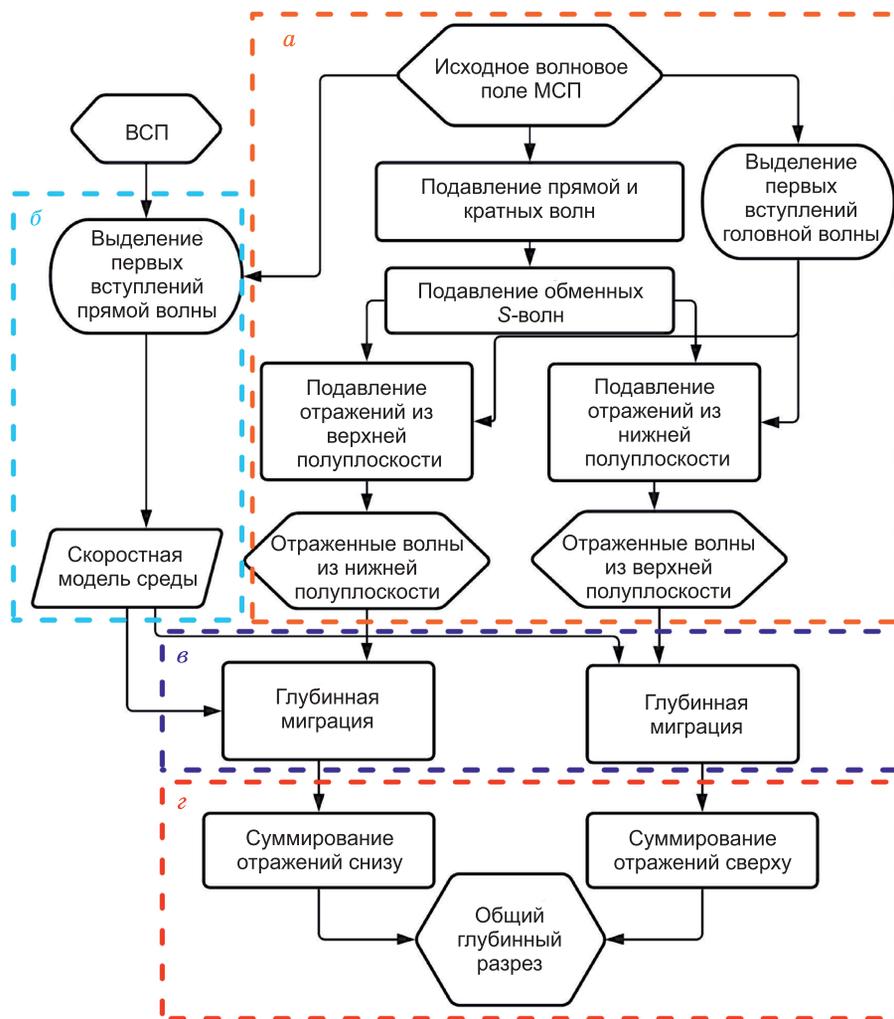


Рис. 8. Общая схема получения глубинного сейсмического разреза с помощью отраженных волн при межскважинном просвечивании.

a—z — пояснения в тексте.

который позволяет получить физически и геологически адекватное решение. В приведенном примере шаг сетки модели выбран равным 4 м по горизонтали и 4 м по вертикали.

Лучевое покрытие для томографии на проходящих волнах показано на рис. 9, *a*. Результатом расчета томографии является скоростное распределение между скважинами от земной поверхности до забоя (рис. 9, *б*).

Высокая неоднородность скоростной характеристики в приведенном примере обусловлена генетическими факторами изначально нарушенного геологического массива, возникшим вследствие этого предаварийным состоянием проработанной территории, а также последующим осушением аварийного участка и тампонажем ослабленных зон. Информация о скоростях ниже забоя скважины получена на основании анализа головных волн при межскважинном просвечивании [Чугаев и др., 2020], а также по материалам ВСП [Санфиоров и др., 2018] и акустического каротажа в глубоких разведочных скважинах вблизи изучаемого участка.

Полученная скоростная модель является основой выполнения миграционных преобразований при переходе из временной области в пространственную.

МИГРАЦИЯ ПОЛЯ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН

Сложность построения глубинного разреза на отраженных волнах при межскважинном просвечивании заключается в том, что для горизонтально залегающих пластов с глубиной меняются обе координаты

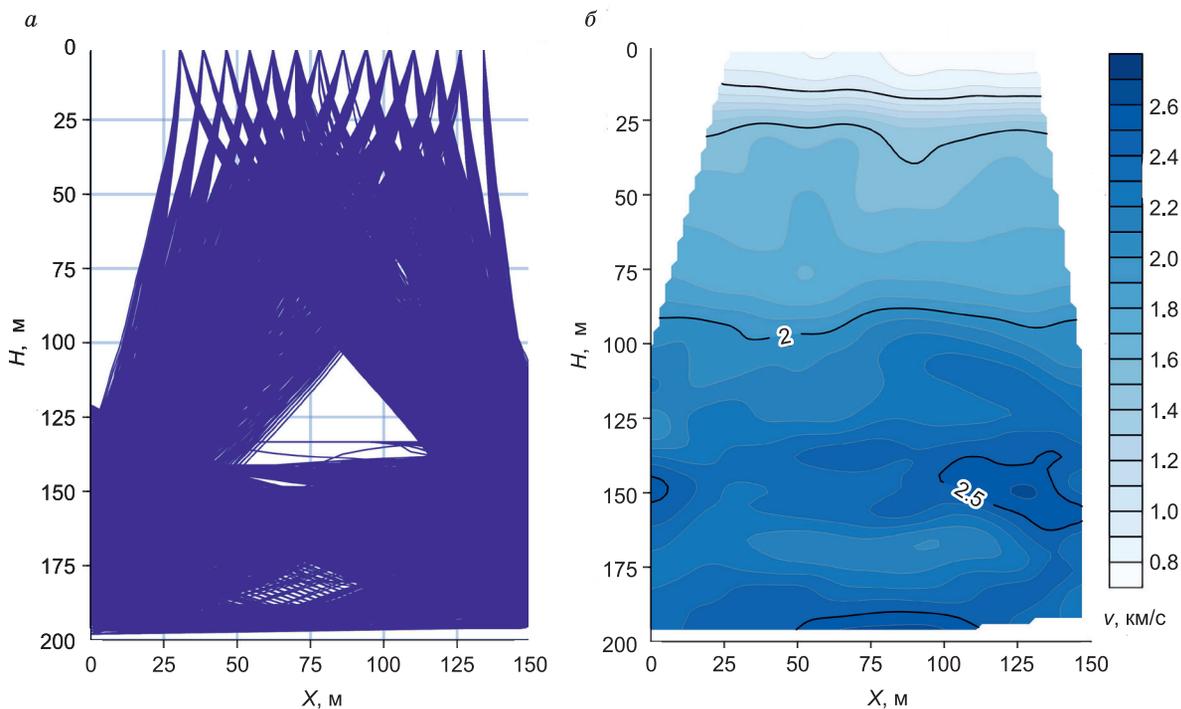


Рис. 9. Сейсмическая лучевая томография на прямых проходящих волнах:

a — лучевое покрытие, *б* — скоростное распределение.

наты точек отражений для одной пары источник—приемник (рис. 10). Для привязки положения трассы в пространстве необходимо вычислить координаты точки отражения для каждого времени трассы.

В простейшем случае постоянной скорости в среде, координата X точки отражения относительно излучающей скважины на глубине H от поверхности может быть найдена как

$$X = \frac{L(H - Z_S)}{(H - Z_S) + (H - Z_R)}, \quad (3)$$

где Z_S и Z_R — соответственно глубины источника и приемника. Известные координаты точки отражения позволяют определить путь волны и затрачиваемое на него время t ; в предположении постоянства скорости v , это время может быть вычислено по формуле

$$t = \frac{\sqrt{X^2 + (H - Z_S)^2}}{v} + \frac{\sqrt{(L - X)^2 + (H - Z_R)^2}}{v}. \quad (4)$$

Таким образом, при миграции глубине H будет соответствовать сигнал, записанный в трассе на времени t . Множество трасс с различными парами координат источника и приемника сейсмического сигнала формирует для каждой заданной глубины ряд точек условного отражения с различными значениями координаты X и ставит им в соответствие амплитуды волнового сигнала, что в итоге и формирует глубинный разрез.

В следующем промежуточном приближении скорость в межскважинном пространстве непостоянна, но пути от излучателя до точки отражения и от точки отражения до приемника по-прежнему считаются прямолинейными, что не соответствует физико-геометрическому процессу распространения волны, но удобно для математического описания до перехода к итоговому алгоритму миграции. В этом случае координаты точки условного отражения определяются таким же образом, а время в пути складывается из множества интервалов d_i прохождения линейных равновеликих, но разноразностных, участков, на которые разбивается путь:

$$t = \sum_i \frac{d_i}{v(X_i, H_i)}. \quad (5)$$

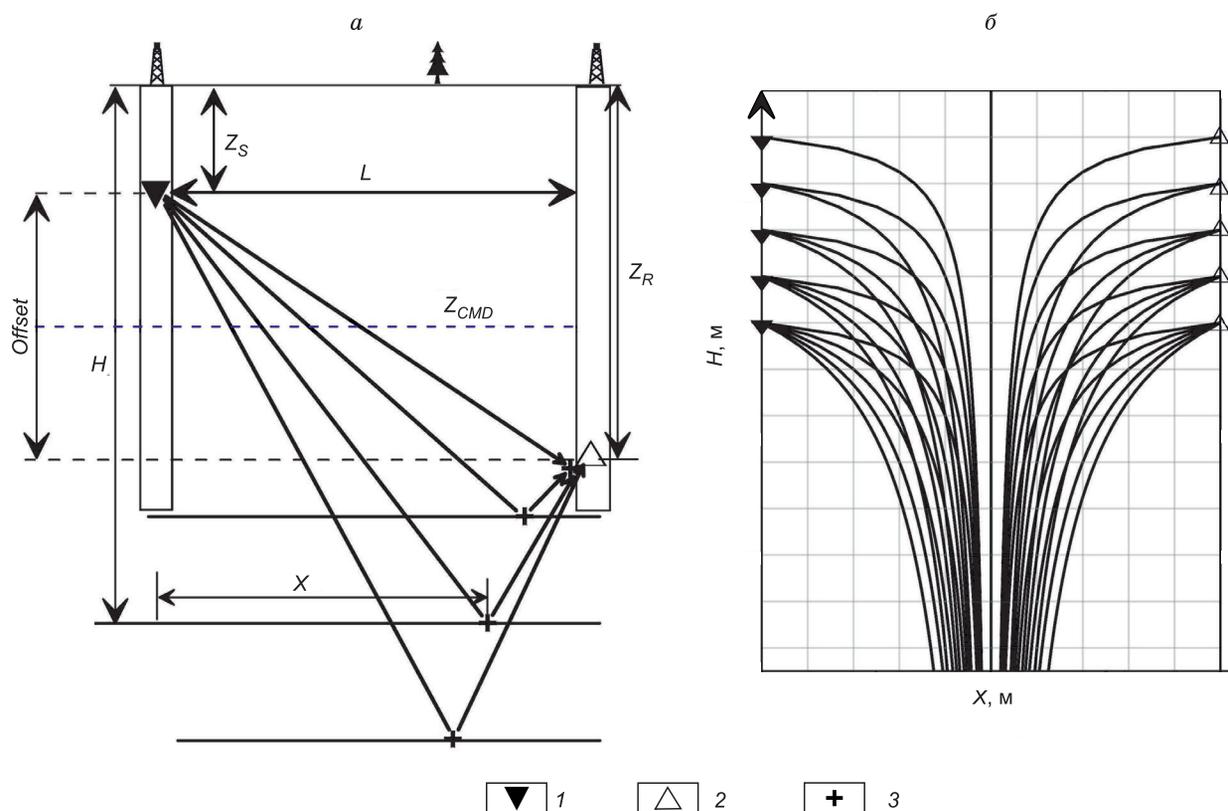


Рис. 10. Положение точек отражения в горизонтально-слоистом разрезе:

a — фиксированная пара источник—приемник; *б* — траектории трасс отраженных волн в плоскости межскважинного просвечивания при отражении из нижней полуплоскости. 1 — источник, 2 — приемник, 3 — точка отражения.

Учет латеральных вариаций положения точки условного отражения при трансформации трасс из пространства времен в пространство глубин требует решения прямой задачи для каждого варианта расположения источника и приемника в скважине. В таком случае необходимо для пары источник—приемник определить путь прохождения волны в кусочно-линейном варианте, когда все пространство разбито на некоторые, в нашем случае прямоугольные элементы. Границы элементов совпадают с сеткой, задающей скорости распространения волн в среде.

Каждый раз для каждой пары источник—приемник необходимо найти такой путь волны, когда она, выйдя из точки излучения, проходя по непрерывному множеству конечных элементов и подчиняясь законам геометрической сейсмологии (законам Снеллиуса), придет в точку расположения приемника. В случае, отличном от однородной среды, такой путь не является элементарным и потому ищется методом последовательных приближений, когда увязываются начальное направление луча и конечная координата. Вероятность точного попадания луча в точку положения приемника в неоднородной среде исчезающе мала, поэтому можно либо задаться точностью попадания, либо использовать какую-либо интерполяцию конечной координаты. Кроме точки приема, значение имеет точка отражения, поэтому ее координаты (горизонтальное удаление от источника) для каждого пути также запоминаются, а затем интерполируются для получения окончательного результата.

Машинные вычисления предполагают дискретность всех вычисляемых величин, поэтому после некоторого количества итераций, когда вариации начального направления волны становятся малы, цикл завершается, а результат ищется в предположении непрерывности получаемых зависимостей координат от начального направления.

Итоговый алгоритм миграции поля отраженных волн. Разработанный алгоритм трансформации трасс отраженных волн учитывает эффект нарушения монотонности времени отражения с глубиной и возможного наложения отражений из низкоскоростной терригенной и высокоскоростной соляной толщи.

Алгоритм предусматривает последовательный перебор глубин и определение для них участка временной трассы по формуле (5), который соответствует этой глубине на основании решения прямой задачи с учетом эффектов преломления на всем пути следования и отражения на заданной глубине. В

результате на основании положения источника и приемника, а также времени регистрации и скоростной модели среды вычисляется координата отражения $X(H)$.

Поскольку энергия сигнала отраженных волн из соляной толщи относительно мала, миграция для глубин ниже кровли солей выполняется только на участке волнового поля, зарегистрированного раньше времени первых вступлений прямой волны.

ПОЛУЧЕНИЕ ГЛУБИННОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

В результате миграции одной сейсмограммы общей средней линии формируется глубинный сейсмический разрез (рис. 11). При этом заполнены только участки, освещенные отраженными волнами, остальная часть не определена и имеет нулевую амплитуду.

Участки сейсмограмм вблизи средней линии наблюдений, характеризующиеся большими углами отражений, отличаются неустойчивыми значениями амплитуд из-за того, что горизонтальная отражающая площадка значительно увеличивается за счет наклонного падения сейсмического луча (рис. 12). Горизонтальные размеры этой площадки можно оценить по формуле

$$d = \sqrt{l\lambda} / \cos \alpha, \quad (6)$$

где l — путь луча, λ — длина волны. Физически эта площадка является пересечением объема Френеля и отражающей границы [Spetzler, Sneider, 2004; Шишкина и др., 2015; Владов и др., 2020]. Участки со слишком большими углами падения (более $60\text{--}70^\circ$) необходимо обнулять при миграции.

Каждая мигрированная сейсмограмма Z_{CMD} уже является однократным глубинным сейсмическим разрезом с введенной поправкой за глубину средней линии наблюдений, что позволяет выполнять суммирование без применения дополнительных процедур.

В процессе обработки данных глубинные сейсмические разрезы отражений из верхней и нижней полуплоскости конструируются раздельно; два получаемых в результате изображения необходимо совместить. Акустическая контрастность одной и той же границы при освещении сейсмическими лучами сверху и снизу будет одинакова по модулю, но противоположна по знаку, соответственно разрез, полученный из верхнего полупространства, необходимо инвертировать до сложения. Результирующий совокупный разрез представлен на рис. 13, *a*.

Для верификации полученных данных проведено их сравнение с результатами наземных сейсмических исследований (см. рис. 13, *b*). Можно отметить явное пространственное совпадение особенностей на приведенных изображениях. В частности, аномалия, выделенная желтым цветом, наклонная ось синфазности на глубинах $180\text{--}200$ м, кровля солей на глубине 210 м. При этом частотный состав скважинного разреза отраженных волн намного шире, видимая длина волны на разрезе порядка $3\text{--}5$ м. Горизонтальная разрешающая способность определяется как половина диаметра первой зоны Френеля (формула (6)) и составляет в данном случае $15\text{--}20$ м, что существенно меньше, чем для наземных исследований, при которых длина волны на разрезе составляет $15\text{--}20$ м, а половина диаметра зоны Френеля для изучаемых глубин оценивается как $40\text{--}50$ м.

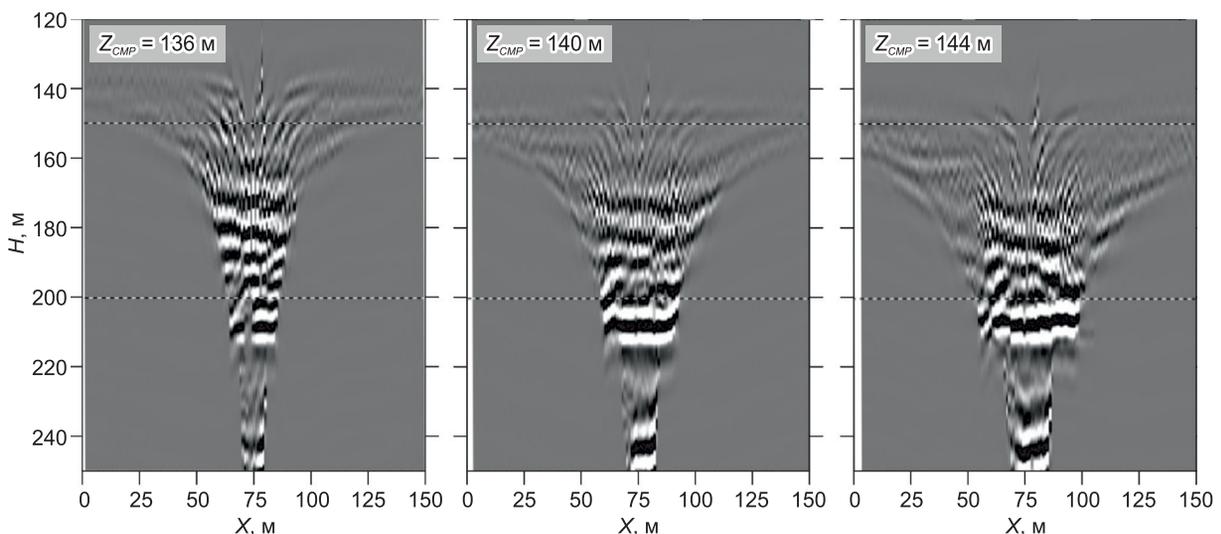
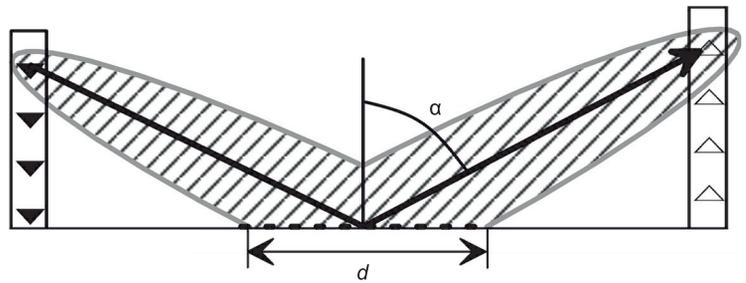


Рис. 11. Мигрированные сейсмограммы общей средней линии наблюдений.

Рис. 12. Оценка ширины d отражающей площадки.

α — угол отражения. Усл. обозн. см. на рис. 10.



К ограничениям предложенной методики необходимо отнести следующее:

1. Ограниченный диапазон видимости. Соотношение расстояния между скважинами и длиной расстановки приема/возбуждения критически влияет на освещенность разреза отраженными волнами. В частности, в приведенном примере расстояние между скважинами составляет 150 м, длина приемной линии по вертикали 70 м. Поэтому в середине интервала результирующего разреза (в окрестности глубины 160 м) по краям присутствуют зоны тени, где сигнал обнулен в процессе миграции в связи с ограничением максимальных углов отражения.

2. Изучение структурного поведения границ ниже кровли соляной толщи ограничено в связи с концентрацией точек отражения вблизи центральной линии между скважинами, по глубине изучение ограничено интерференцией во временной области с прямой волной.

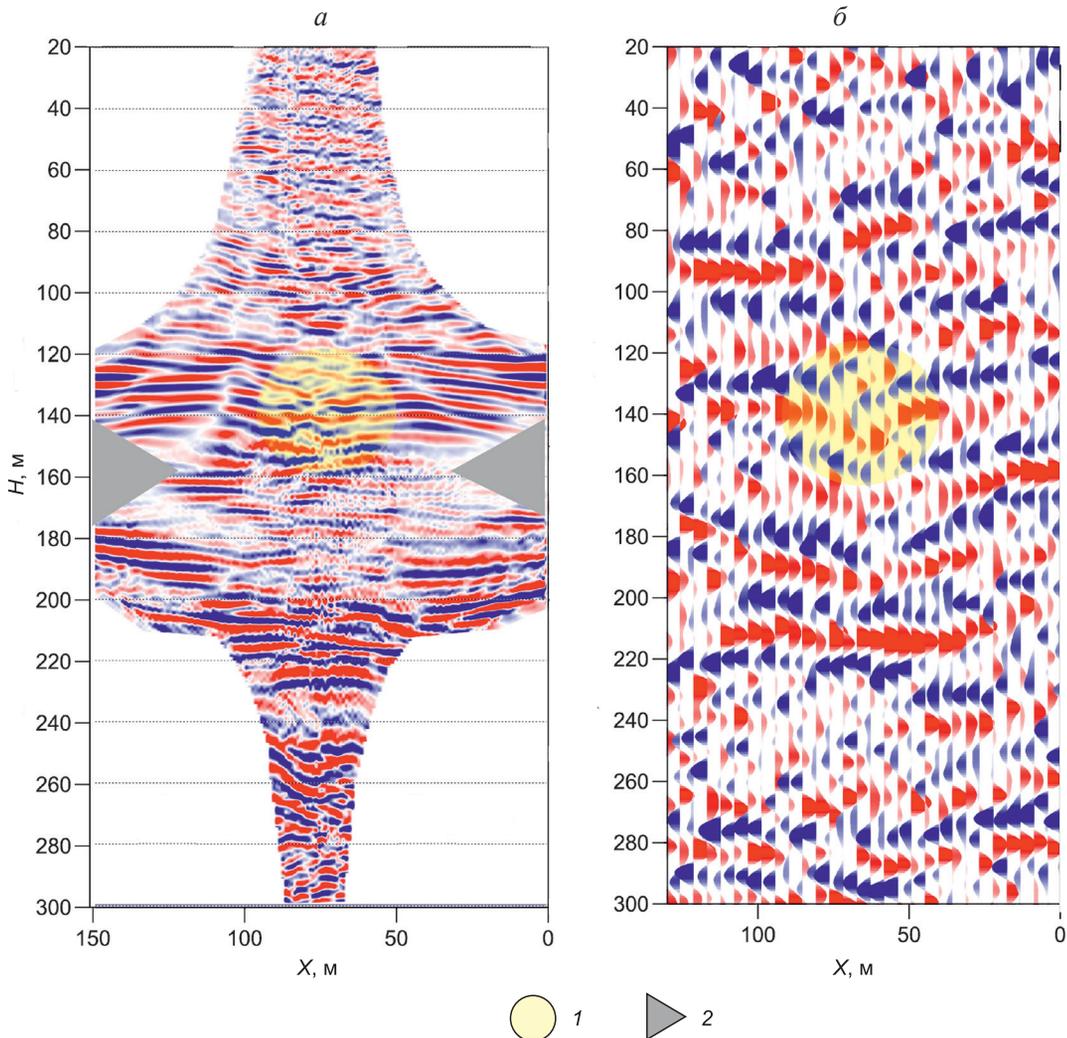


Рис. 13. Результирующий глубинный сейсмический разрез по данным межскважинного просвечивания (а) и разрез по наземным данным на том же участке (б).

1 — аномалия волнового поля, 2 — зона тени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена методика получения глубинного сейсмического разреза по результатам обработки отраженных волн, регистрируемых при проведении межскважинного сейсмического просвечивания, в условиях наличия резкого скачка скоростей, вследствие чего головные и отраженные волны из нижнего полупространства могут регистрироваться раньше первых вступлений прямой проходящей волны. Методика включает предварительное получение скоростного распределения на основании межскважинной многолучевой томографии, выделение отраженных волн из верхнего и нижнего полупространства, миграцию и суммирование. Миграция точек отражения выполняется путем решения прямой задачи на основе лучевой сейсмологии с учетом скоростной модели среды и нарушения монотонности функции времени регистрации отражений от различных горизонтов. Практическое опробование выполнено в сейсмогеологических условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. Полученный разрез характеризуется разрешающей способностью 3—5 м по вертикали и 15—20 м по горизонтали.

Предложенная методика применяется в едином комплексе скважинных сейсмических исследований, включающем трехстороннюю томографию для получения скоростного разреза, изучение поля отраженных волн для получения глубинного сейсмического разреза, изучение головных волн для оценки скоростного разреза вдоль скважин и кровли солей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596032.

ЛИТЕРАТУРА

Болгаров А.Г., Рослов Ю.В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач // Технологии сейсморазведки, 2009, № 1, с. 105—111.

Владов М.Л. Сейсмоакустические многоволновые исследования в водонаполненных скважинах с помощью электроискрового источника упругих волн: Автореф. ... д. ф.-м. н. М., МГУ, 2003, 244 с.

Владов М.Л., Стручков В.А., Судакова М.С., Шмурак Д.В. Томографические просвечивания при больших межскважинных расстояниях: негативные факторы // Инженерные изыскания. М., Геомаркетинг, 2020, т. 14, № 2, с. 42—51.

Калинин А.В., Калинин В.В., Владов М.Л., Мусатов А.А., Пивоваров Б.Л., Стручков В.А., Шалаева Н.В. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки. М., Изд-во Моск. ун-та, 1989, 193 с.

Калинин А.В., Кульницкий Л.М., Владов М.Л., Шалаева Н.В. Межскважинная томография в акустическом диапазоне частот // Разведка и охрана недр, 2002, № 1, с. 41—46.

Ошкин А.Н., Ермаков Р.Ю., Рагозин Н.А., Игнатьев В.И. Межскважинное сейсмическое просвечивание — опыт, методология, аппаратура // Приборы и системы разведочной геофизики, 2016, т. 57, № 3, с. 37—47.

Санфиоров И.А., Чугаев А.В., Бабкин А.И., Лисин В.П., Бобров В.Ю. Горно-технические приложения малоуглубинной скважинной сейсморазведки // Геофизика, 2018, № 5, с. 24—30.

Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г., Герасимова И.Ю., Фаткин К.Б., Глебов С.В. Картирование локальных нарушений водозащитной толщи комплексом многоуровневых сейсморазведочных исследований различной размерности // Материалы 15-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2019», 2019, с. 1—11, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901743>.

Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Чугаев А.В., Бабкин А.И., Байбакова Т.В. Контроль формирования ледопородного ограждения шахтного ствола комплексом наземных и скважинных сейсморазведочных методов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2020, № 3, с. 34—46, doi:10.15372/FTPRPI20200304.

Чугаев А.В., Лисин В.П., Санфиоров И.А., Никифоров В.В., Зеленин В.П. Определение скоростных параметров разреза по сейсмическим скважинным исследованиям // 13-я конференция и выставка «Инженерная геофизика» (24—28 апреля 2017, Кисловодск). Кисловодск, 2017, с. 1—11, doi:10.3997/2214-4609.201700413.

Чугаев А.В., Лисин В.П., Бабкин А.И., Томилов К.Ю. Изучение скоростной характеристики околоскважинного пространства с помощью головных волн, регистрируемых при межскважинном просвечивании // Тезисы докладов 16-й международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика—2020». Пермь, 2020, с. 1—9, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051092>.

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, <http://dx.doi.org/10.18303/1813-4254-2015-1-5-21>.

Antonelli M., Miranda F., Terzi L., Valenti G. Integrated crosswell seismic: case histories in advanced technology to improve reservoir description // *First Break*, 2004, v. 22, p. 49—56, <https://doi.org/10.3997/1365-2397.22.5.25900>.

Baker L.J., Harris J.M. Cross-borehole seismic imaging // 54th Annu. Int. Meet., SEG, 1984, c. 23—25, <https://doi.org/10.1190/1.1894216>.

Byun J., Rector J.W., Nemeth T. Postmap migration of crosswell reflection seismic data // *Geophysics*, 2002, v. 67, p. 135—146, <https://doi.org/10.1190/1.1451423>.

Findlay M.J., Gouly N.R., Kragh J.E. The crosshole seismic reflection method in opencast coal exploration // *First Break*, 2007, v. 25 (7), p. 93—97, <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2007020>.

Harris J.M., Nolen-Hoeksema R., Rector J.W. III, Van Schaack M., Lazaratos S.K. High resolution cross-well imaging of a West Texas carbonate reservoir: Part 1. Data acquisition and project overview // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1992. January 1992, p. 35—39, <https://doi.org/10.1190/1.1822089>.

Khalil A.A., Stewart R.R., Henley D.C. Full-waveform processing and interpretation of kilohertz crosswell seismic data // *Geophysics*, 1993, v. 58, p. 1248—1256, <https://doi.org/10.1190/1.1443508>.

Lazaratos S.K., Harris J.M., Rector J.W. III, Van Schaack M. High resolution cross well imaging of a West Texas carbonate reservoir: Part 4. Reflection imaging // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1992. January 1992, p. 49—53, <https://doi.org/10.1190/1.1822130>.

Lebedev M., Dorokhin K. Application of cross-hole tomography for assessment of soil stabilization by grout injection // *Geosciences*, 2019, v. 9 (9), p. 399, <https://doi.org/10.3390/geosciences9090399>.

Li G., Stewart R.R. Common reflection-point stacking of crosswell seismic data: Friendswood, Texas // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1994. January 1994, p. 42—45, <https://doi.org/10.1190/1.1932116>.

Matsushima J., Rokugawa S., Kato Y., Yokota T., Miyazaki T. Cross-well CDP stacking and diffraction stacking with stacking velocity analysis in inhomogeneous media // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1997. January 1997, p. 254—257, <https://doi.org/10.1190/1.1885877>.

Menu F. Ore-body delineation using borehole seismic techniques for hard rock exploration. Ph.D. Thesis. Univ. of Curtin, Australia, 2018, 177 p.

Menu F., Greenwood A., Dupuis C. Ore-body delineation using borehole seismic techniques for hard rock exploration // 23rd Geophys. Conf., ASEG, Extended Abstracts, 2013, <http://dx.doi.org/10.1071/ASEG2013ab037>.

Nolet G. A breviary of seismic tomography. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2008, 344 p., <https://doi.org/10.1017/CBO9780511984709>.

Raji W., Gao Y., Harris J. Wavefield analysis of crosswell seismic data // *Arabian J. Geosci.*, 2017, v. 10, p. 1—9, <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2964-6>.

Rector J.W. III, Lazaratos S.K., Harris J.M., Van Schaack M. High resolution cross-well imaging of a West Texas carbonate reservoir: Part 3. Wavefield separation // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1992. January 1992, p. 45—48, <https://doi.org/10.1190/1.1822118>.

Smalley N., Harris J.M. CDP stacking and imaging of cross-well reflectors // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1992. January 1992, p. 87—90, <https://doi.org/10.1190/1.1822244>.

Spetzler J., Snieder R. The Fresnel volume and transmitted waves // *Geophysics*, 2004, v. 69, p. 653—663, <https://doi.org/10.1190/1.1759451>.

Van Schaack M., Harris J.M., Rector J.W. III, Lazaratos S.K. High resolution cross-well imaging of a West Texas carbonate reservoir: Part 2. Wavefield analysis and tomography // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts 1992. January 1992, p. 40—44, <https://doi.org/10.1190/1.1822104>.

Wong J., Stewart R.R. Crosswell seismic imaging of a tight-gas reservoir // SEG Tech. Program, Expanded Abstracts, 2007, p. 442—446, <https://doi.org/10.1190/1.2792459>.

Yu G., Meyer J., Payton C., Zhang Y.F., He X.H., Kong Q.F. A case study of high resolution crosswell seismic imaging in complex reservoir // 72nd Annu. Int. Meet., 2002, SEG Expanded Abstracts, p. 2377—2380, <https://doi.org/10.1190/1.1817194>.

Yu G., Bryans B., Ju C., Liang B., Zhou F. High-resolution crosswell seismic imaging in JiangSu Oil-field, China // 73rd Annu. Int. Meet., 2003, SEG Expanded Abstracts, p. 2251—2254.