

# Метод межскважинного сейсмоакустического просвечивания, как инструмент детального изучения разреза

- Ошкин А.Н., Вязниковцев А.А., ООО «Неоген», МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва.
- Игнатъев В.И., ООО «Геодавайс», г. Санкт-Петербург.

*В статье представлен опыт авторов по применения метода межскважинного сейсмоакустического просвечивания для целей изучения геологического разреза на глубины до 200 м на одном из объектов строительства. Используется как временная томография (кинематическая инверсия первых вступлений), так и миграция отраженных волн в том числе от границ ниже забоя скважины. Любопытным фактом является ярко выраженная анизотропия вендских глин, представленных в изучаемом разрезе, без учета которой невозможны корректные расчеты.*

## Введение

Разрешающая способность сейсмических методов зависит от длины волны изучаемого сигнала, поэтому старания многих инженеров направлены на повышение частоты излучаемого источниками зондирующего импульса. Однако многочисленные фактические наблюдения говорят о том, что наличие частот выше 100 Гц в спектрах регистрируемых в наземной сейсмике данных – это очень большая редкость, как правило, частоты сигнала находятся левее этой отметки. И это справедливо в том числе для наземной инженерной сейсморазведки, частоты в которой сопоставимы с нефтяной. Существует, однако, целое направление, которое может похвастаться невероятными разрешениями в доли метра – инженерная сейсморазведка на акваториях. [Потемка и др., 2023]

Почему бы не использовать источники, применяемые в морской «инженерке» для наземной? Ответ прост – проблема не столько в источниках, сколько особенностях устройства дневной поверхности на суше.

Первые несколько метров дневной поверхности представлены сухими породами, чаще всего с нарушенной структурой, с большим объемом порового пространства, корнями растений и т.п. Помимо этого, верхняя часть разреза

отличается крайне высокими поглощающими свойствами, что является наиболее пагубным фактором, влияющим на получение высокочастотных записей. Именно в верхней части разреза составляющие сигнала с частотами более 100 Гц претерпевают очень большое поглощение и, как правило, не выходят за пределы этого слоя.

У авторов есть опыт регистрации Р-волн, с частотами около 1 кГц, возбужденных классической для инженерной сейсморазведки кувалдой. Но возбуждение и регистрация происходили на плотном интрузиве, зона выветривания, а тем более слой почвы, отсутствовали, что и позволило высокой частоте распространяться и не затухать в среде.

## Метод межскважинного сейсмоакустического просвечивания (МСП)

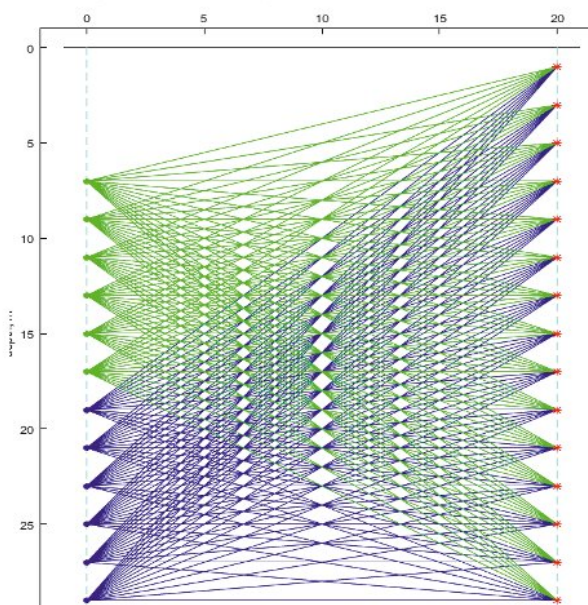
Редко используемый в нефтяной сейсморазведке, но достаточно широко распространенный в инженерной, метод МСП позволяет уйти от этой проблемы простым решением – в нем источники и приемники сигнала располагаются в скважинах, то есть, ниже дневной поверхности, что и позволяет работать на частотах в сотни, а иногда и тысячи герц.

Так как стоимость изготовления скважины глубиной порядка 100 м невелика в сравнении со стоимостью всех изыска-

ний, для ответственных объектов участок строительства разбуривается по заранее заданной сетке, на которой и производятся работы МСП. В условиях плотной городской застройки подобный подход может быть единственным решением изучения среды вдали от скважины, так как дневная поверхность может быть по большей части недоступна для проведения изысканий. Метод также позволяет изучать разрез непосредственно под зданиями без бурения горизонтальных скважин.

Технология метода понятна из названия: в одной из скважин размещается коса с приемниками, во второй скважинных излучатель, который перемещается по скважине в процессе съемки [Ошкин и др., 2016]. Воздействие с каждой точки излучения регистрируется множеством приемных устройств в соседней скважине, таким образом формируется система многократно пересекающихся сейсмических лучей (Рис. 1).

▼ Рис. 1. Схема последовательной регистрации сейсмической косой. Приемная скважина слева. Синие лучи – регистрация при стоянке косы на забое, зеленые лучи – регистрация при стоянке косы на следующем интервале.



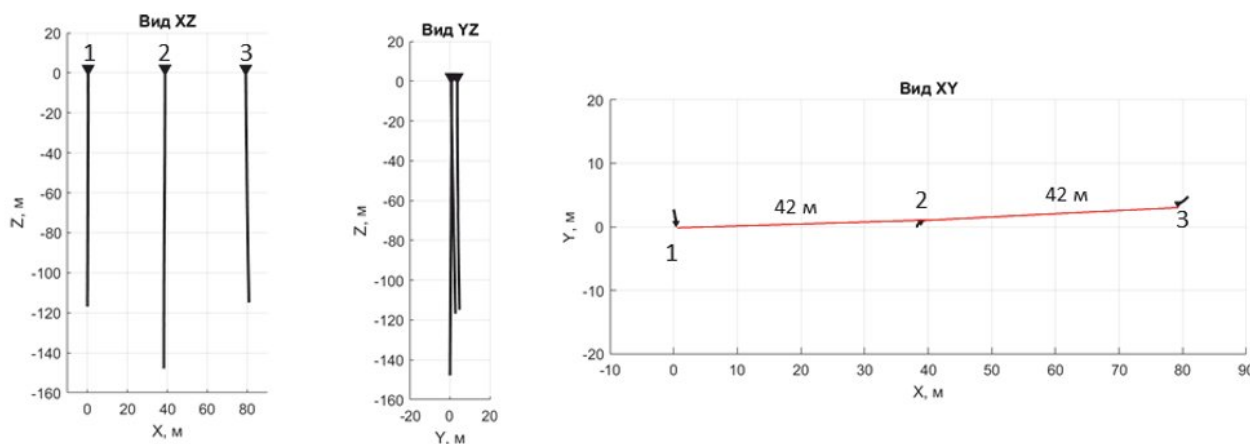
В качестве скважинных источников для целей МСП хорошо себя зарекомендовали электроискровые источники, или т.н. «спаркеры», а в качестве приемников – многоканальные косы с гидрофонами. Поскольку и для тех, и для других устройств процесс упругих колебаний может быть передан через воду в скважине, дополнительный прижим им не требуется. Спаркер способен генерировать частоты свыше 1 КГц, в то время как верхняя граница рабочего диапазона частот гидрофонов составляет около 10 КГц.

Далее в статье демонстрируются материалы, полученные с использованием электроискрового спаркера «Pulse» в связке с высоковольтным накопителем «Jack-2500HP» в качестве излучателя, и комплекта из двух 24-точечных гидрофонных кос «WellStreamer» и сейсмостанции «ЭЛЛИСС-3». Перечисленное оборудование производится российскими компаниями «Геодевайс» и «Геосигнал».

Просвечивание выполнялось в трех скважинах, расположенных на одной оси с шагом 42 м. Глубина центральной скважины составляла 165 м, глубины крайних чуть менее 117 м. Излучатель располагался в крайних скважинах, регистрация производилась в центральную на 48 точек приема. Шаг съемки по скважинам составлял 1 м как для ПВ, так и для ПП.

Дополнительно была выполнена инклинометрия для дальнейшего учета искривления стволов скважин от вертикали (Рис. 2).

Задачей исследований было уточнение геологического строения среды, выявление возможных неоднородностей в межскважинном пространстве, потенциально опасных для будущего строительства.



▲ Рис. 2. Траектории стволов скважин в различных плоскостях.

Пример полученных данных продемонстрирован на Рис. 3. В первых вступлениях уверенно выделяется высокочастотная волна во всем диапазоне исследований. Преобладающая частота растет от 300 Гц в приповерхностном интервале возбуждения вплоть до 650 Гц при возбуждении на забое скважины. Подобные частоты недостижимы в наземной сейсморазведке.

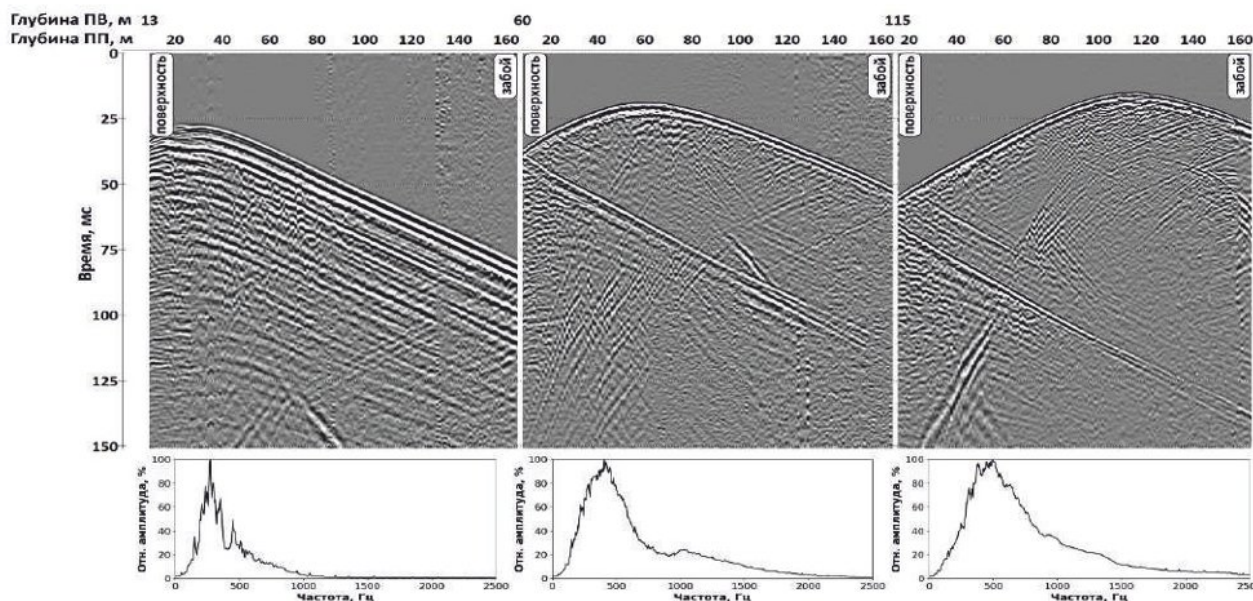
### Кинематическая инверсия (временная томография)

Наиболее простым решением при работе с данными метода МСП является выполнение кинематической инверсии

времен прихода волн, в основном прямых продольных (первые вступления). Высокочастотный сигнал спаркера позволяет оценивать времена прихода с большой точностью, что, в свою очередь, позволяет выполнять расчленение геологического разреза с недоступной для наземных исследований детальностью.

При выполнении кинематической инверсии алгоритм томографии итеративно решает прямую задачу, подбирая значения скоростей в ячейках межскважинного пространства так, чтобы минимизировать невязку между наблюденными

▼ Рис. 3. Пример данных, регистрируемых при выполнении МСП со спаркером и гидрофоном. Сейсмограммы ОПВ и соответствующие им амплитудные спектры. Шаг съемки 1 м по ПП.



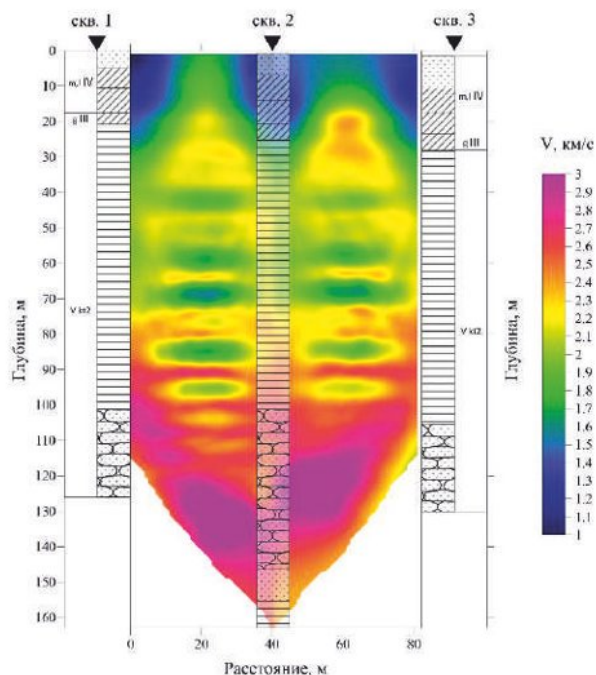
ми и расчетными для данной итерации временами прихода целевых волн.

Отличительной особенностью метода МСП является регистрация лучей, распространяющихся в широком диапазоне углов (см. Рис. 1), от горизонтальных до 40 или даже 30 градусов к вертикали. Очевидно, что анизотропия горных пород в межскважинном пространстве должна учитываться при решении прямой задачи в алгоритмах томографии. Однако в подавляющем большинстве случаев анизотропией пренебрегают. Авторы статьи как правило поступают так же, так как для ее введения нужны основания, а результаты инверсии без учета анизотропии как правило не противостоят сведениям о геологическом строении.

Попытка выполнить инверсию «в лоб» без учета анизотропных свойств привела к неадекватному результату (Рис. 4).

На полученных разрезах ярко выражена несогласованность значений скорости продольных волн в их нижней (более 110 м) части. Помимо этого, в верхней и

▼ Рис. 4. Результат стандартной кинематической инверсии.



нижних частях разреза проявляются диагональные артефакты инверсии, свидетельствующие о том, что невязка для данных, соответствующих сравнительно большим вертикальным смещениям приборов, компенсируется за счет нереалистичных структур.

Так как скважины для геофизических исследований бурились с отбором керна и его последующим анализом, было известно, что общее строение среды горизонтально слоистое, типичное для морских песчано-глинистых отложений, что не соответствовало результатам кинематической инверсии.

Особенностью описываемой работы было наличие мощного слоя глин вендского возраста, характеризующихся выраженной слоистостью (Рис. 5).

Для изучения анизотропных свойств были выполнены ультразвуковые измерения на образцах верна. Например, на Рис. 6. приведены записи, выполненные по методике просвечивания в горизонтальном направлении образца из Рис. 5. на S-волнах. Поляризация S-волн при этом менялась на горизонтальную (в плоскости слоистости) и вертикальную (поперек плоскости слоистости). Вертикальной пунктирной линией показаны одинаковые времена прихода паразитной Р-волны, скорость которой не зави-

▼ Рис. 5. РФото среза образца керна анизотропных глин, представленных в разрезе. Ориентация изображения соответствует естественному залеганию.



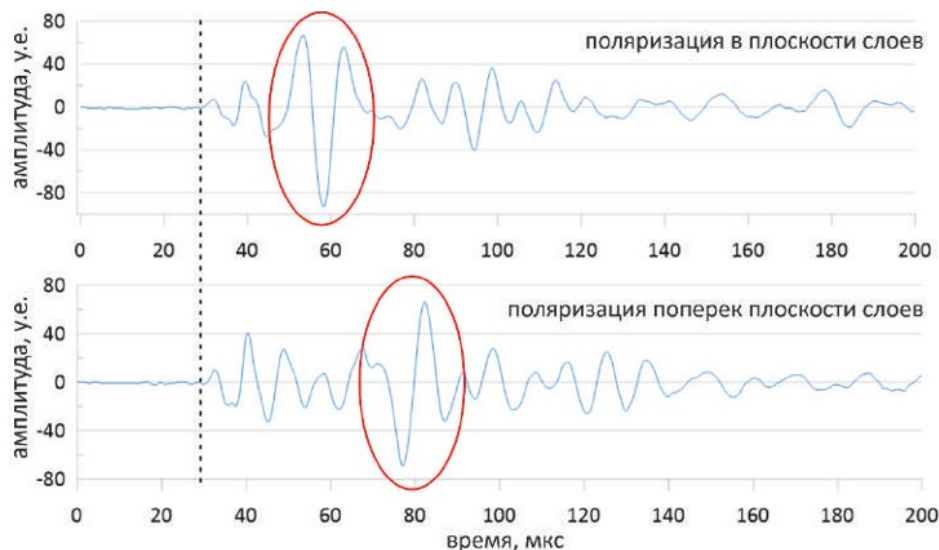
► Рис. 6. Записи сигнала при выполнении ультразвуковых измерений на образце.

Направление просвечивания – горизонтальное вдоль слоев.

Наверху S-волна поляризована в горизонтальной плоскости

(в плоскости слоев),

внизу в вертикальной (перпендикулярно плоскости слоев).



сит от ориентировки датчиков. А вот времена прихода S-волн (импульсы S-волн обведены в красные овалы) существенно зависят от плоскости поляризации датчиков. Подобное поведение характерно для анизотропных сред типа VTl, и прямо вытекает из структуры глин.

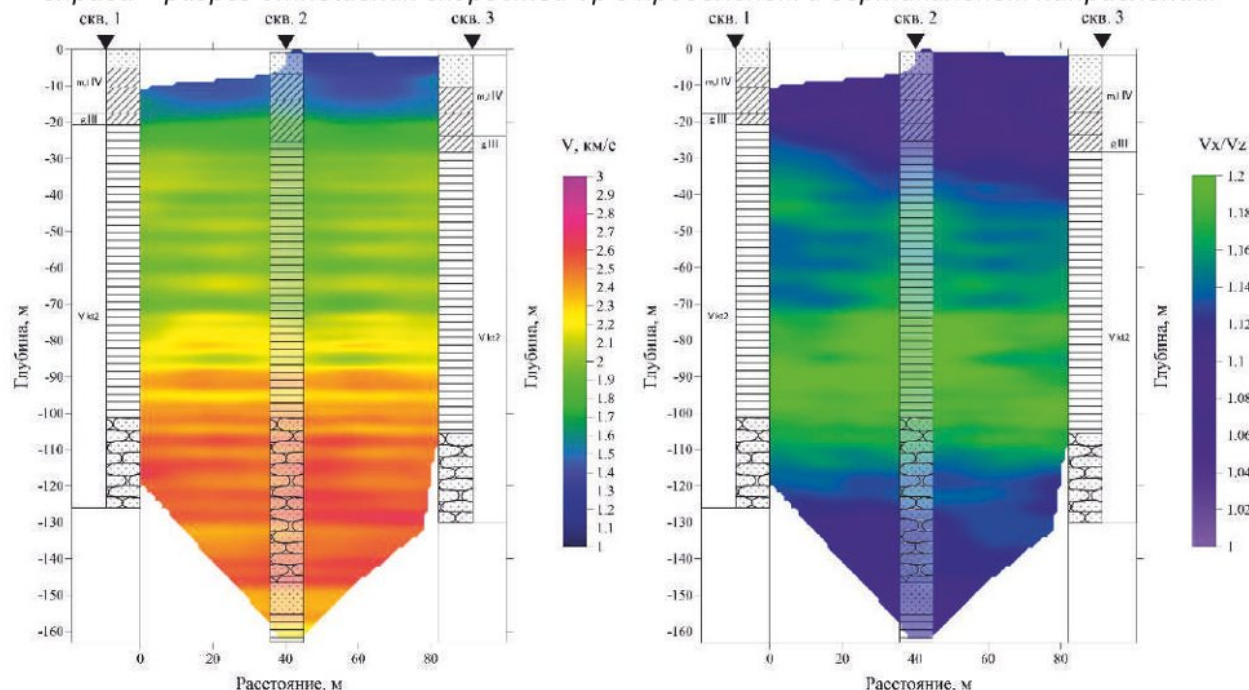
Важно отметить, что во время транспортировки до лаборатории образцы

керна высохли и существенно изменили свои упругие характеристики, поэтому целью лабораторных ультразвуковых измерений были не абсолютные значения скоростей, а подтверждение факта наличия анизотропных свойств изучаемых глин. Именно поэтому на Рис. 6. продемонстрированы особенности поведения S-волн, как любопытные читателям, а не

▼ Рис. 7. Результат кинематической инверсии с учетом анизотропных свойств среды.

Слева – разрез скоростей  $V_p$  в межскважинном пространстве.

Справа – разрез отношения скоростей  $V_p$  в продольном и вертикальном направлении.



отношение скоростей Р-волн, на которых проводились исследования методом МСП. В данном случае важным было подтверждение факта наличия сильной анизотропии упругих свойств.

Кинематическая инверсия с учетом анизотропных свойств среды продемонстрировала геологичный результат, согласующийся с результатами бурения (Рис. 7).

Наиболее выразительным результатом является анизотропия, достигающая 20% для слоя глин вендского возраста (Рис. 7. справа). В подошве слоя на глубинах 70-105 м анизотропия выражена сильнее и даже распространяется на кровлю подстилающего слоя песчаников до глубин около 115 м. При этом кровля вендских глин четко прослеживается по анизотропным свойствам – покрывающие четвертичные отложения изотропны и согласованы с результатом по глубине.

Следует также отметить, что на разрезе скоростей  $V_p$  (Рис. 7. слева) уверенно выделяются слои, мощностью до 2 м, причем на всей глубине исследования, что демонстрирует высокую разрешающую способность метода МСП, не зависящую от глубины.

### Миграция отраженных волн и построение разреза ниже забоя скважин

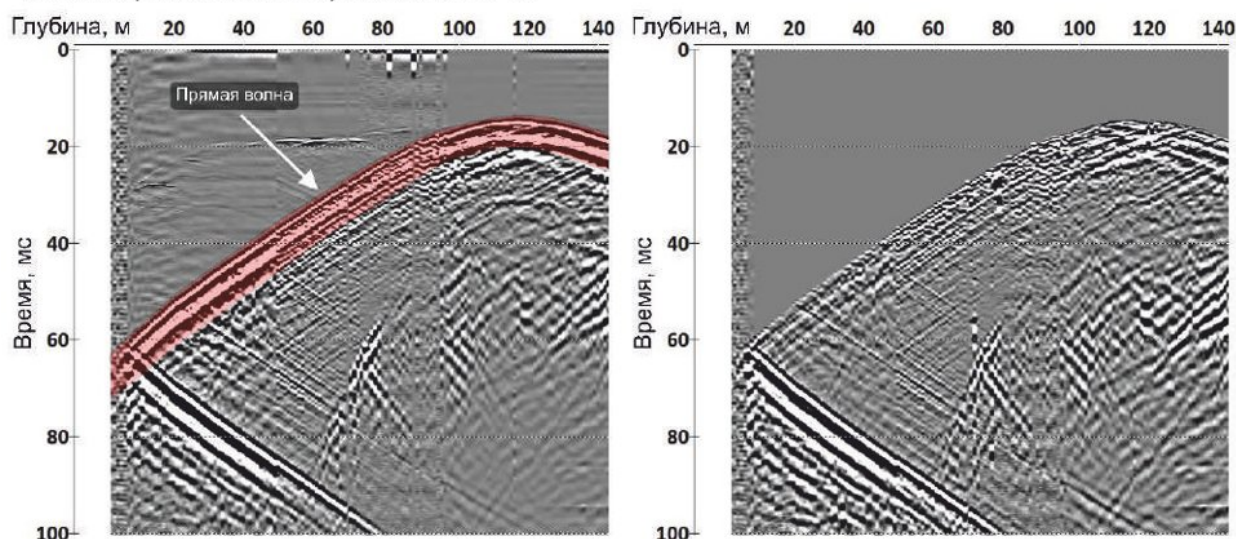
Использование только первых вступлений и полный отказ от анализа волновой картины, к сожалению, является стандартной практикой применения метода МСП по крайней мере в России. Между тем, как видно из Рис. 3., волновое поле крайне богато на отраженные волны, причем как нисходящие, так и восходящие, в том числе от границ ниже забоя скважин.

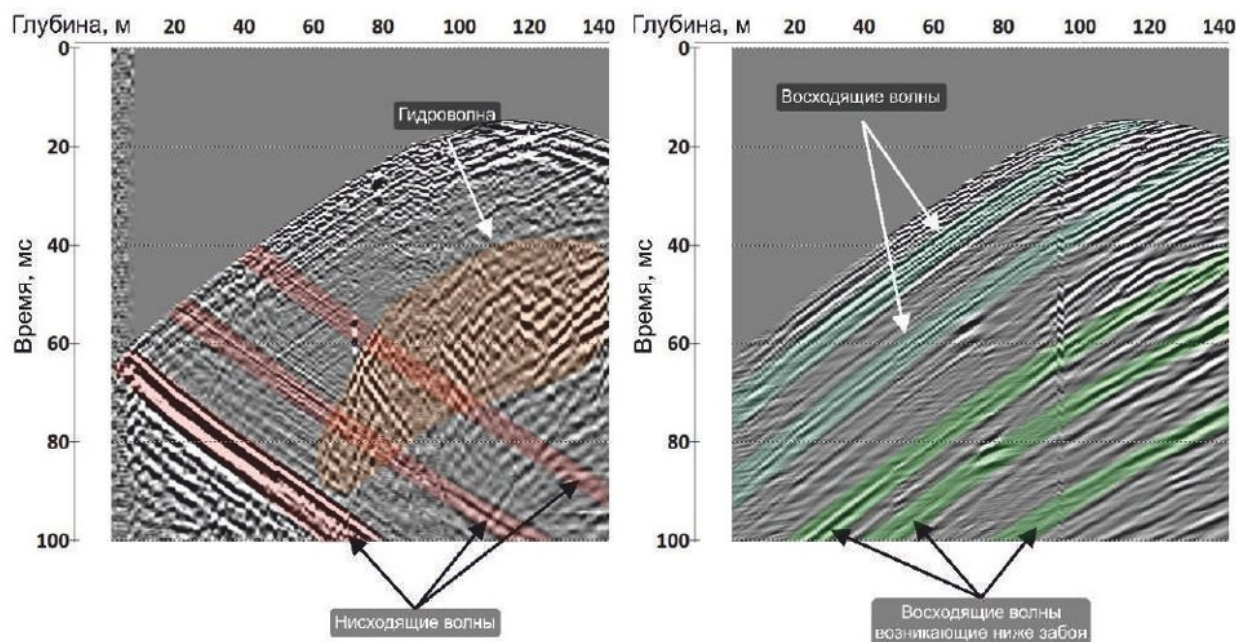
Для расширения информации о разрезе и для увеличения глубинности исследований было принято решение выполнить миграцию Кирхгофа поля отраженных волн, с помощью алгоритмов, разрабатываемых авторами.

На начальном этапе была выполнена сигнальная обработка данных: частотная фильтрация от волн помех, корректировка усиления, подавление прямой волны методом вычитания среднего вдоль ее годографа и  $f$ - $k$  фильтрация для формирования поля отраженных волн заданного направления (восходящих).

Примеры результатов применения перечисленных процедур приведены на Рис. 8. и Рис. 9.

▼ Рис. 8. Результат подавления прямой Р-волны. Слева до, справа после процедуры. Сейсмограмма ОПВ. Глубина ПВ 117 м.





▲ Рис. 9. Результат выделения поля восходящих отраженных волн, в том числе от границ, расположенных ниже забоя скважин. Слева до, справа после выполнения процедуры  $f$ - $k$  фильтрации. Сейсмограмма ОПВ. Глубина ПВ 117 м.

На Рис. 9. видно, что после подавления нисходящих отражений, а также после подавления поля предположительно обменных гидроволн, регистрируемых с запозданием, на всем времени регистрации наблюдаются годографы отраженных восходящих волн, в том числе от границ, расположенных ниже забоя скважин.

Построение изображения среды в поле отраженных волн было выполнено с использованием миграции Кирхгофа. Выражение прямой задачи, представленное в виде интегрального выражения (1), связывает модельную сейсмограмму  $U(\xi, t)$  параметризованную с помощью пространственного вектора  $\xi$  аналитический импульс  $F[t]$ , также именуемый сигнатурой источника и положение рефлектора  $\Sigma = \Sigma(x)$ , представляющего собой поверхность интегрирования.

$$U(\xi, t) = \frac{1}{2\pi} \iint d^2x W(\xi, P_\Sigma) \partial_t F[t - \tau(\xi, P_\Sigma)]|_{z=\Sigma(x)} \quad (1)$$

выражение  $P|_{z=\Sigma(x)} = (x, \Sigma(x))$  в данной постановке является произвольной точкой на поверхности интегрирования. Одной из важнейших величин подынтегрального выражения является функция Грина  $\tau(\xi, P)$ , которая может быть вычислена как сумма времен пробега от источника  $S(\xi)$  и приемника  $G(\xi)$  до точки  $P_\Sigma$  на рефлекторе:

$$\tau(\xi, P_\Sigma) = T(S(\xi), P_\Sigma) + T(G(\xi), P_\Sigma) \quad (2)$$

Помимо этого, в интегральном выражении участвует величина  $W(\xi, P_\Sigma)$ , являющаяся весовой функцией, зависящей от наклона рефлектора, коэффициента отражения и амплитудных коэффициентов. Последние могут быть вычислены при нахождении функции Грина исходя из геометрических соображений при лучевом трассировании, или непосредственно в ходе волнового моделирования.

В дискретном случае вычисление данного интеграла сводится к конечной сумме по отдельным фрагментам реф-

лктора  $P_R(\xi) = P_\Sigma|_{x=x(\xi)}$  при фиксированном значении параметра  $\xi$ . На практике, это позволяет получить простейшую аппроксимацию для амплитуды на модельной сейсмострассе от источника  $S$  и приемника  $G$ , отвечающее данному фрагменту рефлектора  $P_R$ :

$$U_{SGP_R}(t) = U_{P_R}(\xi, t) \sim \frac{\mathcal{R}(\xi)}{\mathcal{L}(\xi)} F[t - \tau(\xi, P_R)], \quad (3)$$

Где  $\mathcal{R}(\xi)$  - коэффициент отражения на фрагменте рефлектора, а  $\mathcal{L}(\xi)$  - поправка за геометрическое расхождение.

При использовании дискретных моделей с прямоугольной сеткой каждую ячейку модели можно считать рефлектором с соответствующими значениями  $\mathcal{R}$ . Если же в действительности ячейку не пересекает рефлектор, то значение  $\mathcal{R}$  в таком случае принимается нулевым. Исходя из вышеописанных соображений итоговое выражение для  $U(\xi, t)$  можно

представить в следующем виде:

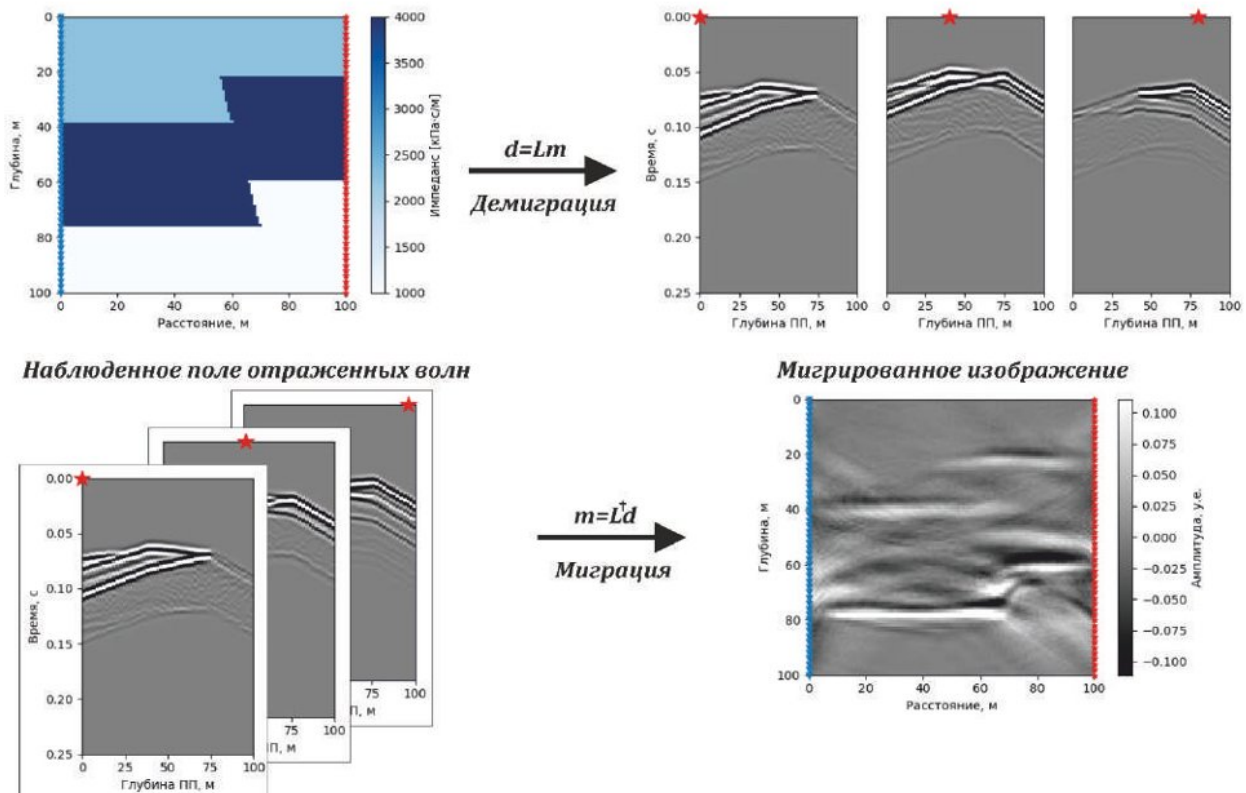
$$U(\xi, t) = \sum_{P_R} U_{P_R}(\xi, t) \quad (4)$$

которое с учетом (3), по своей сути является обыкновенным линейным оператором  $L$ . Переобозначив разрез коэффициентов отражения как вектор  $\mathbf{m} = \mathbf{m}(\mathbf{x})$ , а модельное волновое поле  $U(\xi, t)$  как вектор  $\mathbf{d}$ , получим классическое выражение для прямой задачи миграции Кирхгофа:

$$\mathbf{d} = L\mathbf{m} \quad (5)$$

Оператор  $L$  в таком случае называется оператором демиграции. Данный оператор может быть построен после решения прямой кинематической задачи и выбора сигнатуры источника  $F[t]$ . После построения оператора  $L$  нахождение разреза коэффициентов отражения (задача миграции) по наблюдаемым

▼ Рис. 10. Условная схема применения операторов миграции и демиграции на примере примитивной синтетической модели. Излучающая и приемная скважины расположены на левой и правой границе модели.



данным в наиболее простейшем случае может быть осуществлено с помощью комплексно-сопряженного оператора:

$$m = L^{\dagger} d \quad (6)$$

Ниже в схематичном виде проиллюстрирован принцип применения операторов миграции и демиграции (Рис. 10).

Для осуществления миграции поля нисходящих волн и построения изображения ниже забоя скважин была использована модель упругих параметров, полученная в ходе кинематической инверсии с учетом анизотропии. На глубинах более 165 м скоростная модель была экстраполирована со скоростью, достоверно установленной в наиболее глубокой части – 2350 м/с. Для нахождения функций Грина была использована система дифференциальных уравнений луча в модификации трансверсально анизотропной среды:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{\cos \theta}{a}; \\ \frac{dy}{dt} = \frac{\sin \theta}{a} \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{\cos \theta \cdot (\partial a_y - \partial \partial a_{x\theta}) - \sin \theta \cdot (\partial a_x - \partial \partial a_{y\theta})}{a \cdot (a + \partial \partial a_{\theta\theta})} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ y(0) = y_0 \\ \theta(0) = \theta_0 \end{cases}$$

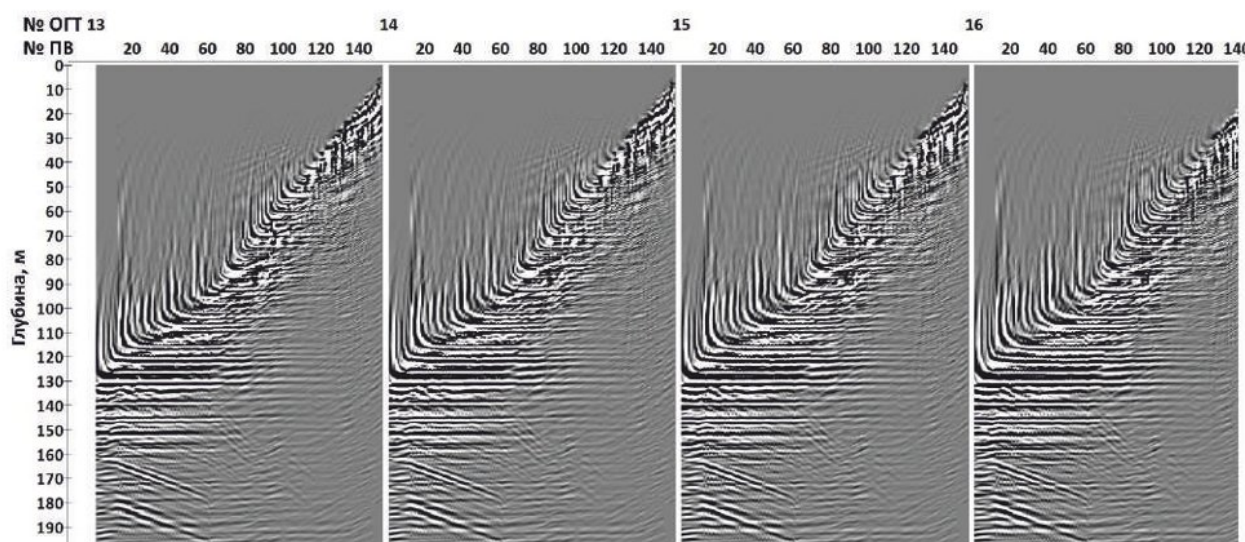
Где  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $\theta(t)$  - координаты и наклон луча в момент времени  $t$ ,  $a$ , - медленность среды. Лучевое трассирование в рамках данной системы дифференциальных уравнений выполнялось с помощью классического метода Рунге-Кутты. Для учета анизотропии была использована аппроксимация скорости продольных волн с использованием параметра Томсена [Thomsen, 1986; Tsvankin, 2005]:

$$1/a(\theta) = V_{p0}(\theta) = (1 + \delta \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) + \epsilon \sin^4(\theta)) \quad (8)$$

Параметр  $\epsilon$  напрямую рассчитывался из разреза отношения скоростей в горизонтальном и вертикальном направлении, в то время как параметр  $\delta$  был принят равным нулю. Данное допущение связано с тем, что параметр  $\delta$  по определению связан с компонентами тензора упругости  $C_{13}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{55}$ , которые не могут быть достоверно определены при наличии данных лишь одного типа волн.

Оператор миграции может быть применен не только ко всей совокупности имеющихся сейсмограмм, но и к каждой сейсмограмме в отдельности – данный подход позволяет контролиро-

▼ Рис. 11. Мигрированные сейсмограммы для пары скважин 1-2 в сортировке ОГТ.



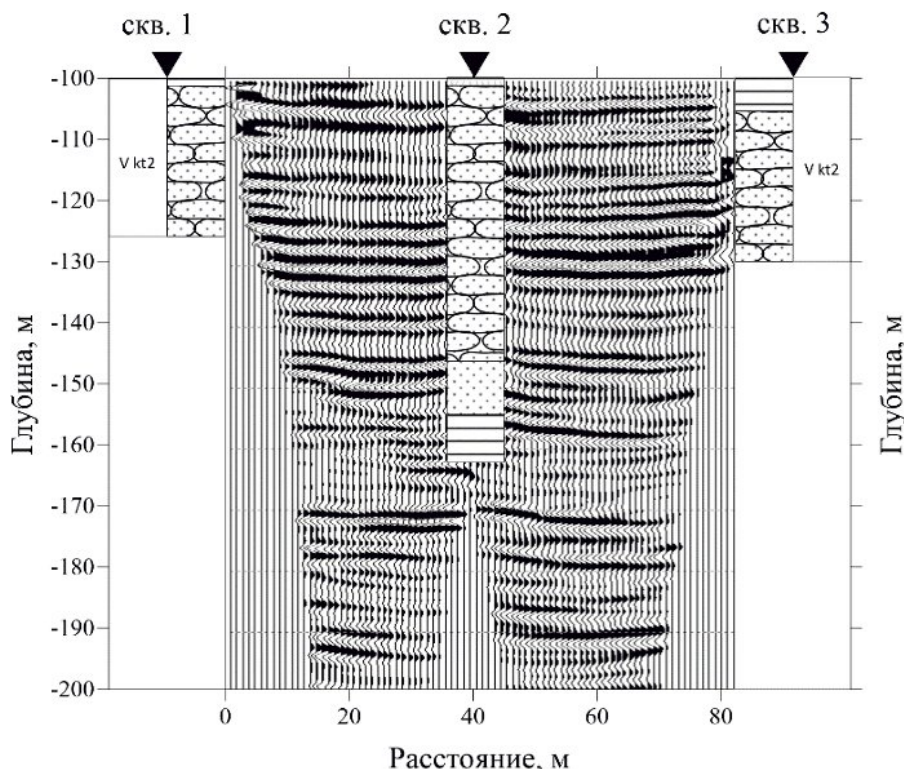


Рис. 12.  
Результат  
миграции  
отраженных  
волн.

вать качество процедуры путем оценки когерентности осей синфазности на сейсмограммах ОГТ (Рис. 11).

На мигрированных сейсмограммах можно отчетливо наблюдать, что оси синфазности отражений в основной своей массе имеют строго горизонтальную конфигурацию, что может свидетельствовать о конструктивном суммировании. Незначительные артефакты, представленные сравнительно короткими фрагментами наклонных осей, не могут значительно повлиять на качество результата, так как их влияние будет подавлено самой процедурой суммирования. Отдельного комментария заслуживает изгиб отражений на диагонали каждой из мигрированных сейсмограмм – он возникает на границе перехода нисходящие-восходящие волны. Поскольку для миграции в данном случае были использованы только восходящие волны, выше данного изгиба вовсе не наблюдается когерентных отражений, что является вполне естественной картиной.

После суммирования сейсмограмм ОГТ и мьютинга по границе лучевого покрытия было получено итоговое изображение среды в диапазоне глубин 100-200 м (Рис. 12). По результатам миграции, можно сделать вывод, что строение разрезов в подзабойном пространстве преимущественно горизонтально-слоистое, о чем свидетельствует конфигурация осей синфазности отраженных волн в пределах всего целевого интервала.

Так как построенный разрез не полностью вскрыт скважинами, однозначно подтвердить результаты построений ниже забоя скважины 2 не представляется возможным. Однако тут важно отметить тот факт, что миграционные преобразования выполнялись для каждой пары скважин отдельно. Таким образом, согласование общего строения среды на двух независимых, но примыкающих друг к другу участках указывает на вероятно корректно работающий алгоритм.

## Выводы

Метод межскважинного сейсмоакустического просвечивания позволяет работать с двумя типами данных: по временам пробега волн можно строить скоростные разрезы высокого разрешения и полученные модели использовать для миграции отраженных волн.

Высокая частота сигнала позволяет достигать разрешенности, недоступной для наземных методов. Кроме того, глубинность метода теоретически ограничена только глубиной используемых скважин, при этом детальность съемки от нее не зависит.

В настоящий момент аппарат миграции данных МСП несовершенен, однако он развивается, и в обозримом будущем должен позволить получать более качественные изображения среды, в том числе ниже забоя скважин.

## Литература

1. Ошкин А. Н., Ермаков Р. Ю., Рагозин Н. А., Игнатьев В. И. Межскважинное сейсмическое просвечивание – опыт, методология, аппаратура. // Приборы и системы разведочной геофизики. 3.2016, стр. 37–47.
2. Потемка А. К., Токарев М. Ю., Буланова И. А., Кудинов А. А., Яковенко А. Д., Бабушкина К. В. Эффективность мультимасштабных сейсмоакустических наблюдений для изучения разреза четвертичных отложений в северной части Карского моря. // Геофизика, 2.2023, с. 34–41.
3. Santos T., Schleicher J., Tygel M., Hubral P. Seismic modeling by demigration // Geophysics. 2000. V. 65(4), P. 1281–1289.
4. Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics. 1986. V. 51. P. 1954–1966.
5. Tsvankin I. Seismic signatures and analysis of reflection data in anisotropic media: Handbook of geophysical exploration // Seismic exploration. V. 29. Elsevier Science Publ. Co., Inc., 40–4. 2005

## Подробнее об авторах



### Ошкин

**Александр Николаевич**

Гендиректор ООО "Неоген", ассистент кафедры сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М. В. Ломоносова. К. ф.-м. н.



### Вязниковцев

**Андрей Александрович**

Геофизик ООО "Неоген", аспирант кафедры сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М. В. Ломоносова.



### Игнатьев

**Владимир Иванович**

Руководитель проектов GEODEVICE