

Принципы построения диаграммы псевдоакустического каротажа по данным ВСП

■ Тихонов А.А., ФГБУ «ВНИГНИ», г. Москва.

Аннотация: Представление критических данных метода Вертикального Сейсмического Профилирования (ВСП), таких как вертикальный годограф или интервальная скорость, в виде каротажных кривых, помогает специалистам при рассмотрении критически важных задач интерпретации данных сейсморазведки, решаемых с использованием данных ГИС. Один из основных результатов ВСП, характеристика отражательной способности - сейсмическая Трасса Однократных Отражений (ТОО) представляется, в отличие от годографа или интервальной скорости, в виде сейсмической трассы в масштабе времени. Такое представление осложняет сопоставление ТОО как с каротажными кривыми, так и с данными наземной сейсморазведки. В статье предлагается простое решение задачи эффективного использования данных ВСП путем построения по ним одномерной эффективной тонкослоистой модели скорости и представления её в виде кривой псевдоакустического каротажа (ПАК-ВСП) [4].

Ключевые слова: Вертикальное Сейсмическое Профилирование; Псевдоакустический Каротаж.

Введение

Данные Вертикального Сейсмического Профилирования (ВСП), как метода Геофизических Исследований Скважины (ГИС), обычно регистрируются вдоль ствола каротируемой скважины с постоянным шагом 10м, в отличие от стандартных методов каротажа, таких как акустический (АК) или плотностной каротаж, регистрация которых в геологоразведочных скважинах осуществляется с шагом 0,2 м. Этот факт определяет необходимость согласования разрешающей способности (апскейлинга) результатов детальных методов исследований для обоснованного их сопоставления с данными методов с меньшим разрешением. Традиционно для этих целей предлагается воспользоваться методами частотной фильтрации [4]. Однако, такое согласование носит формальный характер и не обусловлено главным физическим свойством пород, изучаемым по АК и ВСП – отражательной способностью разреза. В рамках данной работы предлагается выполнять согласование упругих и других

физических свойств разреза, измеряемых ГИС и сейсмическими методами в рамках единой Эффективной Модели Физических Свойств (ЭМФС).

Впервые идея использования эффективной модели в качестве решения обратной динамической задачи сейсморазведки была предложена в работе [3] и нашла своё дальнейшее развитие в работах [1,4]. Основным критерием корректности решения было требование совпадения модельного волнового поля с наблюдаемым. В настоящее время в качестве решения обратной динамической задачи, обычно, рассматриваются результаты сейсмической инверсии, выполненной в рамках того, или иного подхода. Рассмотрение алгоритмов и получаемых результатов показывает, что инверсия, собственно, и является инструментом построения Эффективной Сейсмической Модели. Использование результата инверсии и известной формы сигнала позволяет воспроизвести волновое поле, динамические и кинематические характеристики которого соответствуют таковым

для реальных волновых полей, зарегистрированных методами сейсморазведки. При этом, наилучшее совпадение с методологией ЭСМ обеспечивают алгоритмы типа «инверсии редких импульсов», которые обеспечивают решение с использованием минимального количества слоёв.

Построение диаграммы ПАК по данным ВСП.

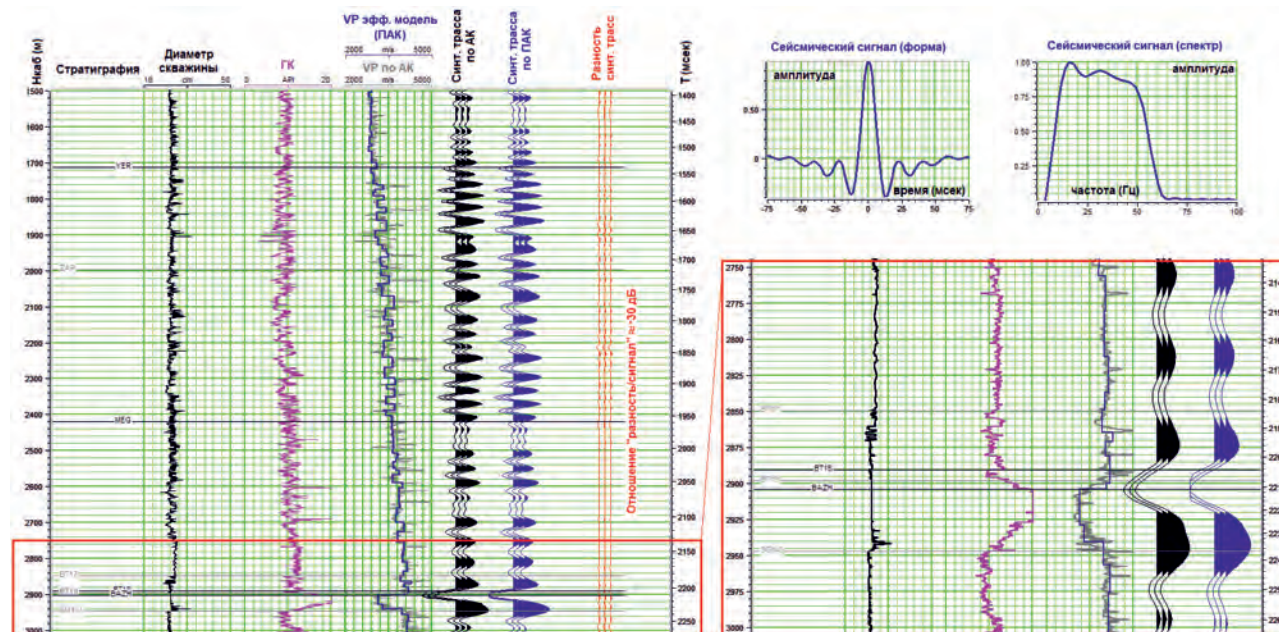
Метод ВСП, реализующий регистрацию волнового поля во внутренних точках среды имеет ряд критических преимуществ перед данными собранными на поверхности. Распределение скоростей сейсмических волн по вертикали измеряется с достаточной для геологической интерпретации точностью, измерение формы сигнала прямой волны даёт возможность приведения формы импульса отраженной волны к желаемой, субвертикальное положение лучей падающих и отраженных волн упрощает учет затухания сейсмической энергии. Другими словами, данные ВСП содержат внутри себя всю необходимую информацию для корректного построения одномерной эффективной тонкослоистой модели скорости и акустического импеданса [1,3].

В работе [1] для построения тонкослоистой модели скорости предлагается использовать данные акустического каротажа, усредняемые в пределах некоторых интервалов. При этом признаётся, что “процедуру осреднения не удастся выполнить на общем аналитическом уровне”. Действительно, для дифференцированных кривых АК трудно формализовать процесс назначения границ пластов, в пределах которых можно провести осреднение данных. К тому же, в этом процессе необходимо учитывать разрешающую способность данных сейсморазведки, достигнутую при сейсмических работах.

В этом отношении идея построения эффективной тонкослоистой модели, заложенная в преобразование ПАК [4] и применяемая к данным ВСП, позволяет обоснованно, с учётом достигнутой разрешающей способности, получить границы тонких пластов и выполнить в пределах этих пластов оценку распределения скорости и импеданса. Естественным требованием к значениям скоростей по ПАК-ВСП является соответствие кривой интегрального времени вертикальному годографу ВСП, а распределение импеданса должно обеспечивать в рамках свёрточной модели совпадение синтетики по ПАК-ВСП, рассчитанной с использованием сигнала ВСП, с ТОО ВСП. Заметим, что в пределах этих же пластов можно выполнить осреднение каротажных данных, что позволит сопоставить упругие параметры, получаемые по каротажу и ВСП в рамках приведенной к единой разрешающей способности [6].

Наиболее используемым на сегодня инструментом построения тонкослоистой модели скорости и акустического импеданса является сейсмическая инверсия [5,9]. С использованием этого инструмента в рамках данной работы была выполнена проверка применимости предлагаемого подхода.

Было проведено исследование, проиллюстрированное на рисунке 1. По данным акустического каротажа с заданной формой сейсмического сигнала, была построена синтетическая трасса однократных отражений, в соответствии с понятием о свёрточной модели сейсмической трассы [8]. По синтетической трассе с использованием алгоритма инверсии редких импульсов была рассчитана тонкослоистая эффективная модель (кривая Псевдо-Акустического Каротажа - ПАК), соответствующая разрешающей способности использованного сейсмического сигнала (показана на рисун-



▲ Рис. 1. Синтетические трассы в сопоставлении с данными ГИС и кривой ПАК.

ке 1 на одном треке со скоростью продольной волны по АК). Расчет синтетической трассы по кривой ПАК с использованием того же сигнала дает сейсмотрассу практически не отличающуюся по форме от синтетической трассы по АК (синяя и черная трассы на рисунке 1). Количественная оценка отношения разности амплитуд этих двух синтетических трасс (красные трассы на рисунке 1) к их осредненной амплитуде составляет порядка $\text{Ашум/Асигнал} \approx -30$ дБ, то есть шумовая составляющая замены АК на ПАК практически отсутствует. Рассмотрение тонкослоистой эффективной модели в сопоставлении с кривой АК в крупном масштабе позволяет заметить, что значения скорости на кривой ПАК практически являются средними значениями скоростей по АК на интервале соответствующего тонкого пласта эффективной модели. Количественные расчеты показали, что значения скоростей в пластах эффективной модели согласуются с расчетами, сделанными в соответствии с теоретическими положениями, изложенными в классической работе Бейкуса [6].

Таким образом, выполняются условия, наложенные на кривую ПАК: рассчитанная

по ней синтетика, совпадает с синтетикой по АК, а интегральное время совпадает с интегральным временем по кривой АК. Другими словами, эффективная модель, построенная по трассе однократных отражений и представленная в формате каротажной кривой, может быть использована для тех же целей сейсмической интерпретации, что и кривая акустического каротажа.

Использование диаграммы ПАК-ВСП для целей сейсмической интерпретации.

Одной из ключевых процедур интерпретации данных наземной сейсморазведки является привязка формы записи отраженных волн к стратиграфическим маркерам геологического разреза и границам целевых пластов. Привязка, как правило, выполняется путём сопоставления формы записи на синтетической трассе, рассчитанной по данным акустического и плотностного каротажей, с записью на трассах наземной сейсморазведки методом отраженных волн, зарегистрированных возле скважины. Критерием достоверности стратиграфической привязки является взаимная корреляция формы записи на синтетической

трассе и сейсмической трассе отраженных волн. Поскольку имеется ряд факторов, как физических, так и технических, влияющих на качество данных каротажа, практически всегда корреляция синтетики с данными сейсморазведки оставляет желать лучшего.

Решением этой проблемы являются данные Вертикального Сейсмического Профилирования - Трасса Однократных Отражений и вертикальный годограф. Годограф ВСП, представленный в виде таблицы, загружается в интерпретационный проект данных сейсморазведки и используется в качестве калибровочной кривой время-глубина (Check-Shot) для кривой акустического каротажа. Это стандартная процедура, поскольку кривая время-глубина, рассчитанная по АК, или априорная кривая, принятая для района работ, не характеризуют достоверно распределение скоростей сейсмических волн по вертикали. ТОО ВСП передается в формате SEG-Y и её сопоставление с данными наземной сейсморазведки напрямую затруднено. Если синтетическая кривая по ГИС рассчитывается и визуализируется на сейсмических данных в любом интерпретационном Программном Обеспечении, то ТОО ВСП в формате SEG-Y наложить на сейсмический профиль затруднительно, особенно для наклонных скважин. Решение может быть найдено путем представления данных ВСП в виде кривой псевдоакустического каротажа, которая по аналогии с кривой акустического каротажа легко интегрируется в сейсмический проект.

Преимуществом использования для стратиграфической привязки кривых акустического и плотностного каротажа является их детальность, что позволяет при наличии других методов каротажа с высокой точностью привязывать их показания к опорным маркерам геологического разреза скважины. Для сопоставления с данными

ми сейсморазведки разрешающая способность каротажа (сантиметры) должна быть согласована с таковой для сейсморазведки (метры, десятки метров). Наиболее распространенным способом согласования разрешающей способности является расчет по данным каротажа синтетической трассы с использованием сигнала, соответствующего сигналу в данных наземной сейсморазведки.

При выполнении ряда условий, таких как целостность ствола скважины, отсутствие различий в скорости для разночастотных данных и т.д., получаемая в рамках сверточной модели синтетическая трасса по каротажу представительно отображает трассу однократных отражений в сейсмическом диапазоне частот. Это является основой стратиграфической привязки, учитывающей также допущение о том, что суммотрасса в данных ОПТ представляет собой, в основном, последовательность однократных отражений. При соблюдении этих условий наблюдается удовлетворительное совпадение формы записи для одного и того же интервала разреза на синтетической трассе и на трассе ОПТ, и приемлемое значение ФВК между ними, определяющее надежность выполненной стратиграфической привязки отражений.

Часто эти идеальные условия нарушаются и интерпретатор вынужден привлекать дополнительные данные для повышения надёжности привязки. В большинстве случаев применяется годограф ВСП, который используется как опорная кривая время-глубина. Обычно, калибровка данных АК по годографу ВСП улучшает корреляцию между синтетикой и трассой ОПТ и повышает надежность стратиграфической привязки. Но что делать, если кривая АК записана с низким качеством по причине разрушения ствола, в непредставительном интервале, или для винтажных

данных вообще отсутствует? В этом случае можно использовать Трассу Однократных Отражений по ВСП, например, «вшив» её в разрез ОГТ вдоль ствола скважины, как делается в некоторых публикациях по обработке данных ВСП [5,9]. В этом случае трасса ВСП будет одной из трасс разреза и можно использовать инструменты интерпретации данных ОГТ для сравнения и оценки количественных параметров.

С другой стороны, в ПО для сейсмической интерпретации наиболее широкий и гибкий набор инструментов разработан для синтетической трассы, рассчитываемой по данным акустического и плотностного каротажей. В этих условиях представление данных ВСП в виде тонкослоистой эффективной скоростной модели, задаваемой в виде каротажной кривой скорости, или, по аналогии с АК, медленности, позволит в полной мере использовать все инструменты сейсмической интерпретации, существенно дополнить и повысить надежность результатов использования имеющихся данных акустического каротажа.

При корректно выполненной обработке данных ВСП, ТОО полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к трассе, используемой для построения тонкослоистой эффективной модели – она содержит только однократные отражения с известной 0-фазовой формой сигнала. Это позволяет обоснованно использовать ТОО ВСП для расчёта кривой ПАК, которую можно в данном случае назвать кривой ПАК-ВСП.

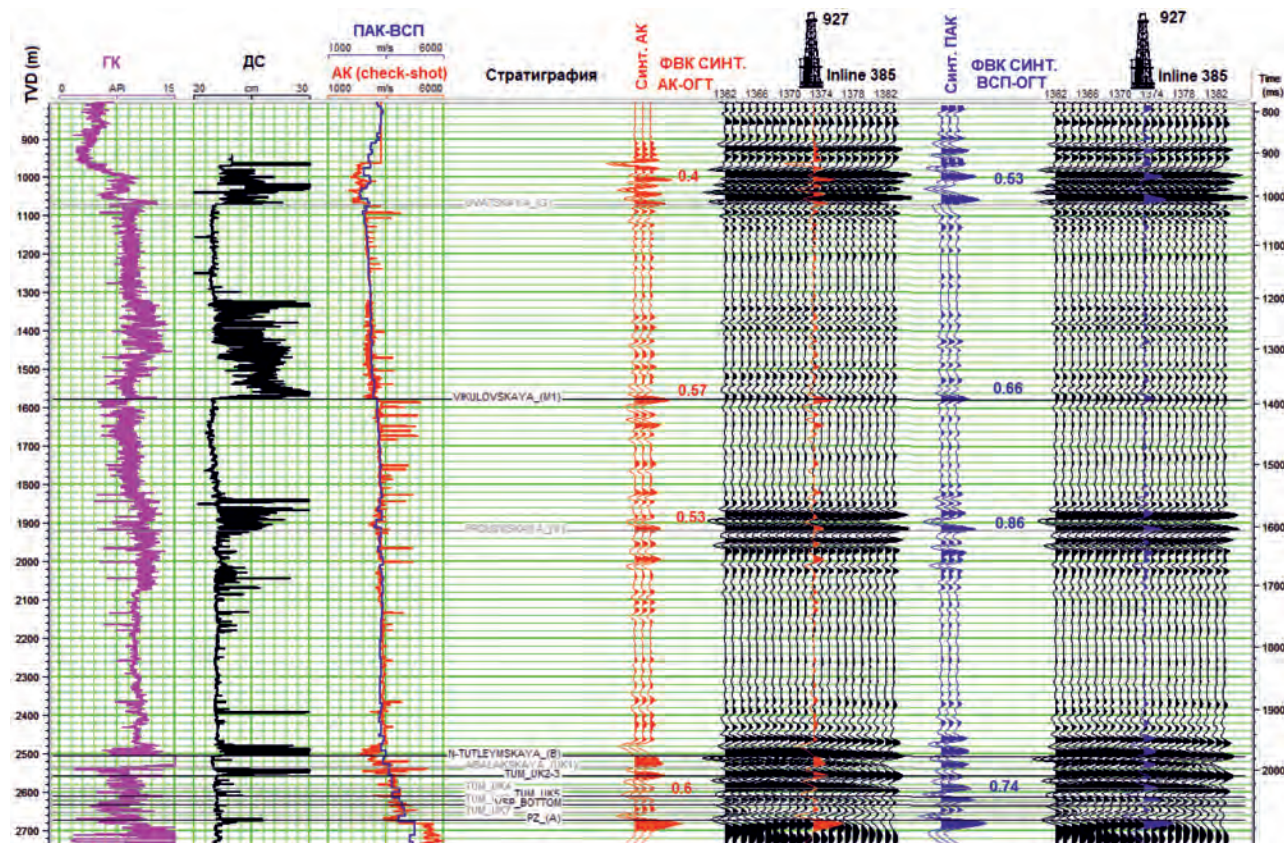
Сопоставление результатов использования ПАК-ВСП и АК.

Использование кривой АК для целей стратиграфической привязки часто сопряжено с проблемами, вызванными несоответствием скоростей по АК сейсмическим скоростям. При этом, относительные

изменения скоростей по АК характеризуют отражательную способность геологического разреза с точностью, достаточной для расчета представительной трассы однократных отражений, которая после калибровки по годографу ВСП, хорошо коррелирует с записью однократных отражений на трассе ВСП и формой записи на ближайших к скважине трассах разреза ОГТ. При условии, что обработка данных скважинной и наземной сейсморазведки выполнена корректно.

На рисунке 2 показан пример такой ситуации. Разность времен вертикальных годографов по АК и ВСП закономерно меняется по профилю с разным градиентом в разных интервалах. Также по кривой ДС отмечаются интервалы разрушения стенок скважины, которые визуальнo коррелируют с изменениями в характере записи на кривой АК. Тем не менее, после калибровки кривой АК по годографу ВСП форма записи отражений на синтетической трассе по реперным отражениям может быть сопоставлена с записью на временном разрезе, хотя и с низкой корреляцией ($FVK = 0.4 - 0.6$). Использование для расчёта синтетики эффективной тонкослоистой скоростной модели построенной по ВСП позволяет получить и сопоставить с временным разрезом запись идентичную записи на ТОО ВСП. Взаимная корреляция между синтетикой по ПАК-ВСП и ближайшими к скважине трассами ОГТ в данном примере существенно повышается, как для всей трассы в целом, так и для отдельных интервалов ($FVK = 0.53 - 0.86$).

Особенностью кривой ПАК-ВСП является то, что она определяется одновременно двумя факторами – отражательной способностью геологического разреза и разрешающей способностью сейсмического метода. Другими словами, такие характеристики тонкослоистой эффективной модели, как



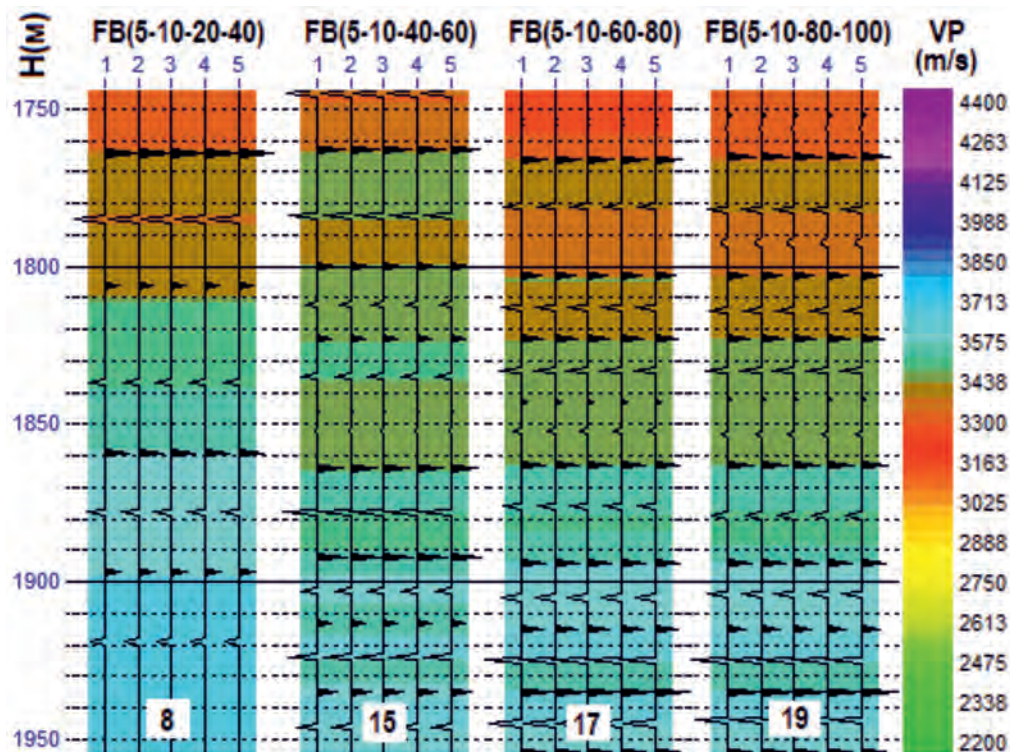
▲ Рис. 2. Синтетические трассы по АК и ПАК-ВСП в сопоставлении с данными ГИС и ОГТ.

мощности пластов и их эффективные упругие характеристики, изменяются при изменении частотного состава сейсмического сигнала. На рисунке 3 показан результат построения эффективных моделей для трасс однократных отражений, рассчитанных для одного и того же распределения скоростей по АК, но для 0-фазового сейсмического сигнала различного частотного состава. Каждая панель на рисунке 3 соответствует эффективной тонкослоистой модели, построенной по синтетической трассе однократных отражений, посчитанной с сигналами, граничные частоты которых даны сверху в скобках. Видно, что количество слоев увеличивается с расширением спектра сигнала, что подтверждает общепризнанный факт - отражательная способность разреза, которую мы в конечном итоге изучаем по данным сейсморазведки, зависит от реализованного частотного диапазона. Это наблюдение хорошо согласуется и с положениями теории

структурно-формационной интерпретации [2]. С практической точки зрения, это означает, что эффективную модель упругих свойств геологического разреза целесообразно строить не только с учётом разрешающей способности, но и с учетом «ранга и масштаба» самих целевых геологических объектов.

Одним из важных аспектов использования данных акустического каротажа при интерпретации является построение низкочастотной модели для выполнения сейсмической инверсии. При этом, зачастую, данные АК по проекту имеются лишь для ограниченных скважинных интервалов. В этом случае полезным будет использование данных ВСП, которые имеются по всему стволу разведочных скважин. Используя скважины с ВСП можно построить более представительную 3-х мерную низкочастотную (НЧ) модель скорости, чем используя калибровку по тем же данным ВСП кривых АК в ограниченных по протя-

► Рис. 3. Эффективные скоростные модели для разных частотных диапазонов. Цифрами обозначено количество слоёв в тонко-слоистой модели.

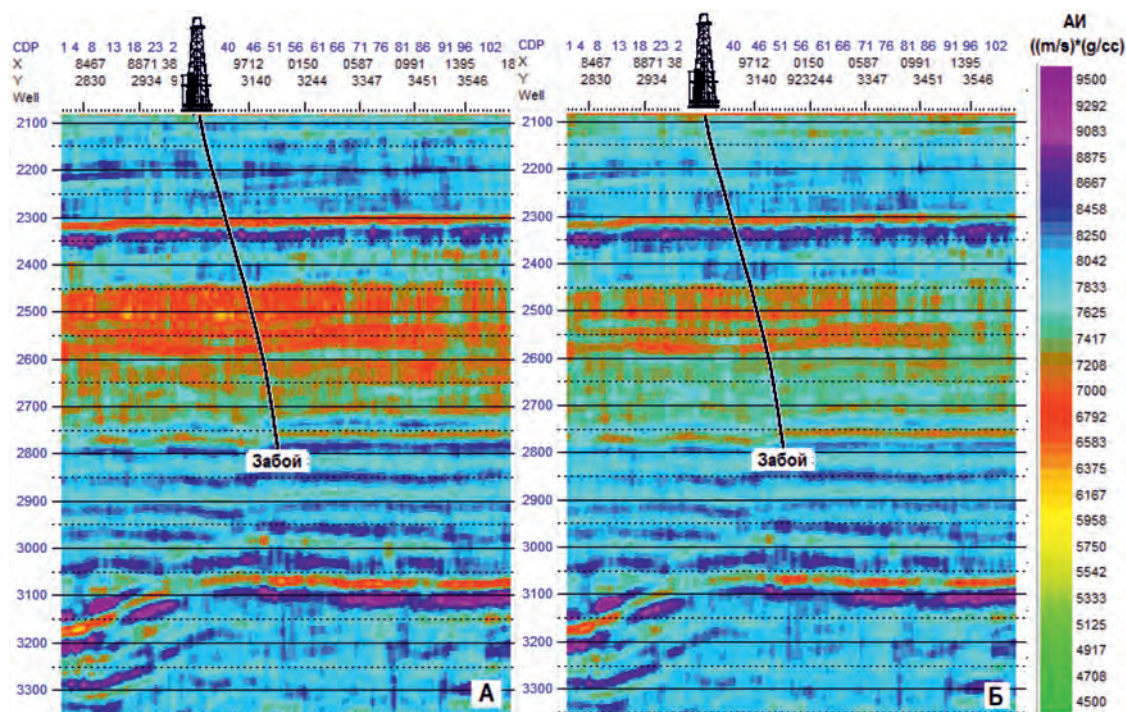


женности интервалах. В новых проектах геологоразведчики учитывают этот факт и выполняют запись кривой АК в широком интервале, практически по всему стволу скважины. Однако, при необходимости выполнить инверсию данных наземной сейсморазведки по винтажным данным,

где АК практически отсутствует, использование данных ВСП в формате кривых псевдо-акустического каротажа помогает решить эту проблему.

На рисунке 4. показан результат сейсмической инверсии данных сейсморазведки 3D по профилю, проходящему через ствол

▼ Рис. 4. Результат инверсии данных сейсморазведки. А) НЧ модель по АК, Б) НЧ модель по ПАК-ВСП.



наклонной скважины. Для разреза на рисунке 4А в качестве НЧ модели использовалась кривая АК (после калибровки по годографу ВСП), а для разреза на рисунке 4Б использовалась кривая ПАК-ВСП. Как видно, различия в разрезах минимальны. То есть, для построения низкочастотной модели скорости при выполнении инверсии корректно использовать кривую ПАК-ВСП.

Выводы

Выполненное в рамках данной работы исследование по формированию по данным ВСП одномерной эффективной тонкослоистой модели сейсмических скоростей, представляемой в виде кривой псевдоакустического каротажа и применимости этой кривой для интерпретации данных наземной сейсморазведки показывает оправданность и простоту данного подхода. Загрузка в интерпретационный проект кривой ПАК-ВСП позволяет быстро оценить надежность стратиграфической привязки, выполненной по данным АК, особенно в тех случаях, когда кривая время-глубина изменялась (растягивалась или сжималась) для достижения наилучшего соответствия формы записи на синтетической трассе и трассе разреза ОГТ.

Кривая ПАК-ВСП также может быть использована для извлечения формы сейсмического сигнала из данных ОГТ практически для любого интервала разреза, а отсутствие ограничения кривой забоем скважины позволяет выполнять прогноз строения разреза ниже забоя скважины.

Эффективная тонкослоистая скоростная модель, представляемая в виде кривой ПАК-ВСП, в полной мере может быть использована и для построения низкочастотной модели скорости при выполнении сейсмической инверсии, что особенно ценно для проектов, где данные АК имеются в неполном объеме.

Литература

1. Берденникова Н.И., Голикова Г.В., и др., 1985, Применение эффективной сейсмической модели., Москва, Недра.
2. Бродов Л.Ю., Козлов Е.А., Мушин И.А., Хатьянов Ф.И., 1990 г, Структурно-формационная интерпретация сейсмических данных, Недра, Москва, 299 стр., УДК: 550.834:553.981/.982, ISBN: 5-247-00556-2
3. Гельчинский Б.Я., 1975, Метод эффективной сейсмической модели., Изд-во ЛГУ, 206 с.
4. Гогоненков Г.Н., 1987, Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой., Недра, Москва, 221 стр., УДК: 550.834
5. Тихонов А.А., 2018г., Современное состояние ВСП, Материалы конференции ГеоЕвразия,
6. Backus, G. E. 1963, Long-Wave Elastic Anisotropy Produced by Horizontal Layering. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 7, 242–247.
7. Robinson, E. A., 1957, Predictive decomposition of seismic traces, *Geophysics*, 22(4), 767–778
8. Taylor H. L., Banks S. C., McCoy, J. F., 1979, Deconvolution with the ℓ_1 norm., *Geophysics*, 44(1), 39–52.
9. Tikhonov A. A., 2003 г., Borehole vicinity characterization using 3C-3D VSP, SEG Technical Program Expanded Abstracts