

Использование SH-волн, возбуждаемых источником «Енисей» в анизотропной среде, при ВСП (на примере одной из скважин Восточной Сибири)

С. Б. Горшкалёв, В.В. Карстен, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск

Введение

Метод вертикального сейсмического профилирования (ВСП) даёт возможность более детального, по сравнению с наземной сейсмо-разведкой, изучения сейсмического волнового поля и геологического разреза [1]. Последовательно наблюдая при ВСП развитие волнового процесса, можно проанализировать процесс образования сложного волнового поля на дневной поверхности. ВСП позволяет изучать процессы отражения и преломления и всю совокупность образующихся вторичных волн, при этом кинематические и динамические характеристики этих волн на вертикальном профиле резко различаются, что является надежным критерием при их распознавании.

ВСП позволяет более точно определить строение околоскважинного пространства. В данные ВСП не требуется вводить статические поправки за приемник, что при наземных наблюдениях в большинстве случаев делается крайне неточно, из-за отсутствия данных о ВЧР. Скорости в среде определяются непосредственно во внутренних точках, что дает информацию об истинных скоростях в породах в условиях их естественного залегания. Скоростная модель строится независимо – по падающим волнам, в то время как глубинный разрез строится по отраженным волнам. Регистрируемая волна проходит ВЧР только один раз, что уменьшает поглощение высоких частот, и поэтому разрезы, построенные по данным ВСП, обладают более высокой разрешённостью, чем разрезы МОГТ, как по глубине (времени), так и по удалению.

Использование комплекса Р- и PS-волн представляет целый ряд преимуществ [2,3]. Совокупность отражённых Р- и PS-волн даёт наиболее полную информацию о строении геологического разреза, поскольку отражающие свойства границ для этих волн различны. Кроме того, соотношение скоростей Р- и PS-волн является поисковым признаком залежей углеводородов, которые характеризуются повышенным значением отношения V_s/V_p , или пониженным значением коэффициента Пуассона. Наконец, использование обменных волн позволяет однозначно определять азимутально-анизотропные интервалы разреза, связанные с направленной трещиноватостью, и, таким образом, прогнозировать направление максимальной проницаемости коллектора.

Методика работ ВСП

Район проведения исследований методом вертикального сейс-

мического профилирования расположен в пределах южной части Сибирской платформы, на территории Красноярского края, в междуречье Ангара и Подкаменной Тунгуски.

Данные ВСП были получены при воздействии с ближнего пункта возбуждения ПВ 1 и трёх выносных ПВ 2–4. ПВ 1 с выносом 112 м отработывался взрывным источником. Выносные ПВ были расположены в 600–700 м от скважины в трёх азимутах, различающихся на 120°. Они отработывались группой из 2 невзрывных импульсных электромагнитных источников «Енисей КЭМ-4» [4], компактно установленных на заранее расчищенной от снега и мохового слоя площадке. Регистрация осуществлялась трёхточечным трёхкомпонентным неориентируемым зондом АМЦ-ВСП-3-48 в интервале глубин 20–2660 м с шагом 10 м.

Обработка данных ВСП проводилась с использованием специализированного пакета VSPLab, созданного под непосредственным руководством авторов. Целью обработки являлось получение скоростной характеристики разреза на продольных и обменных волнах,

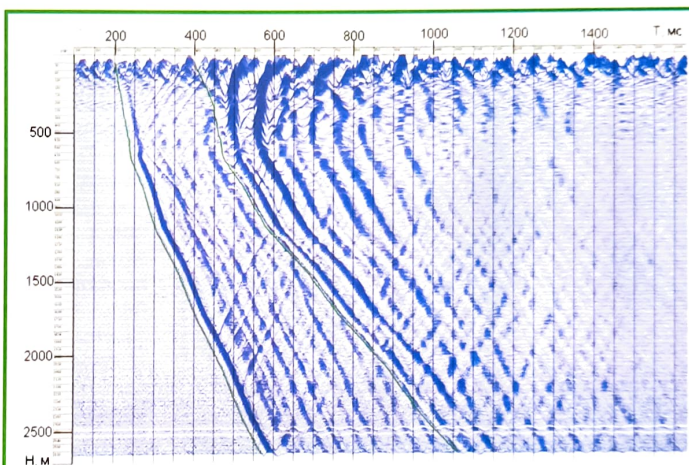


Рис. 1. Скважина ОМ-11, ПВ 3, удаление 620 м, z-компонента. Трёхкомпонентная нормировка в окне прямой продольной волны

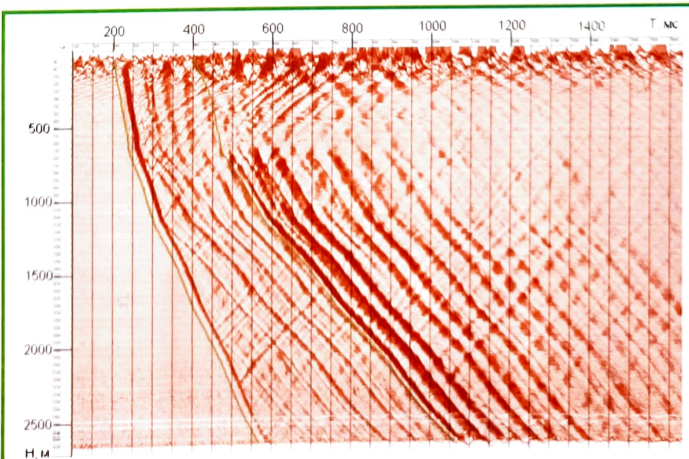


Рис. 2. Скважина ОМ-11, ПВ 3, удаление 620 м, x-компонента. Трёхкомпонентная нормировка в окне прямой продольной волны

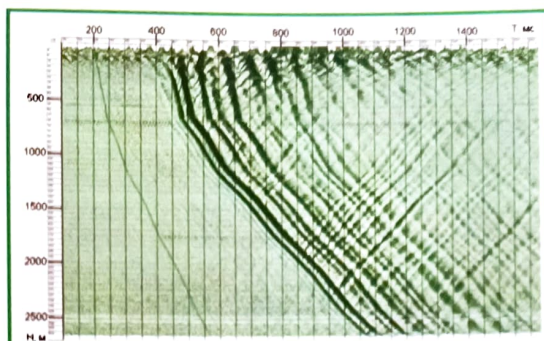


Рис. 3. Скважина Ом-11, ПВ 3, удаление 620 м, у-компонента. Трёхкомпонентная нормировка в окне прямой продольной волны

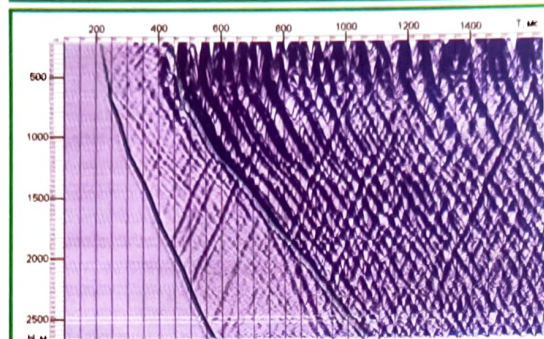


Рис. 4. Скважина Ом-11, ПВ 3, z-компонента. Деконволюция к импульсу Рикера с периодом 25 мс по полю падающих продольных волн

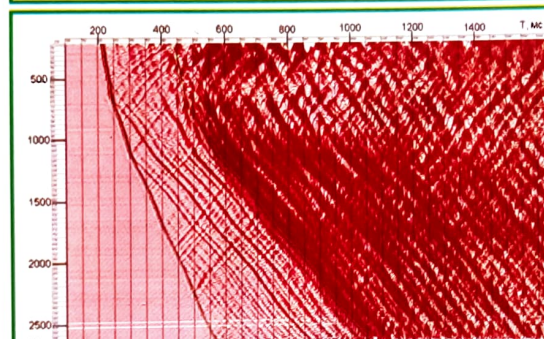


Рис. 5. Скважина Ом-11, ПВ 3, x-компонента. Деконволюция к импульсу Рикера с периодом 25 мс по полю падающих продольных волн

уточнение строения околоскважинного пространства и определение параметров анизотропии геологического разреза.

Особенности волновой картины при невзрывном импульсном воздействии

Волновая картина, регистрируемая при воздействии с выносного ПВ 3, представлена на рис. 1–3. Приведены сейсмограммы z-, x-, и y-компоненты, при этом x- и y-компоненты получены путем анализа вектора смещения прямой продольной волны (x-компонента ориентирована в направлении источник-приемник, а y- — ортогонально ей). Ко всем сейсмограммам применена процедура трёхкомпонентной нормировки в окне прямой продольной волны, сохраняющая соотношение амплитуд x-, y- и z-компонент.

Прямая продольная волна отчетливо видна в первых вступлениях. Её интенсивность, по мере заглубления точки наблюдений, переходит с x- на z-компоненту (рис. 1, 2). Импульс прямой продольной волны отличается высокой стабильностью и имеет период, при воздействии с раз-

ных ПВ, от 20 до 50 мс и видимую частоту от 10 до 50 Гц. В верхней части вертикального профиля в первых вступлениях наблюдается интерференция прямой, отраженных и головных волн продольных, так и обменных.

Отражённые продольные волны отчетливо наблюдаются на z-компоненте. Хорошо видны также обменные волны типа PS, при этом падающие наблюдаются как на x-, так и на z-компоненте, а восходящие – в основном на x-компоненте. Они характеризуются практически теми же частотами, что и продольные волны.

Прямая поперечная волна регистрируется на всех трёх компонентах, причём её интенсивность, по мере заглубления точки наблюдений, переходит с z- на x-компоненту (рис. 1, 2), а на y-компоненте (рис. 3) остаётся постоянной. Она также характеризуется высокой стабильностью формы импульса и представлена сложным колебанием с частотами от 15 до 50 Гц, содержащим несколько периодов различной длительности и не синфазным на различных компонентах. При воздействии с различными выносных ПВ форма импульса поперечных волн существенно различается. В верхней части профиля наблюдается интерференция падающих, отраженных и головных поперечных волн, а также обменных типа SP.

Падающая поперечная волна порождает поле отражённых поперечных волн, наблюдающееся на горизонтальных компонентах. На z-компоненте хорошо видны также порождаемые этой волной весьма интенсивные обменные волны типа SP, в основном отражённые. Они характеризуются теми же кажущимися скоростями, что и продольные волны, и частотами, близкими к частотам поперечных волн.

Всё это приводит к тому, что волновая картина на z- и x-компонентах при воздействии с выносных ПВ оказывается весьма сложной, в ней имеют значительную интенсивность практически все типы волн – продольных, поперечных, и разнообразных обменных. В противоположность этому, y-компонента отличается исключительно простой волновой картиной, содержащей только падающие и восходящие поперечные волны.

Поперечная волна с необходимостью возбуждается источником, действующим на поверхности, но осесимметричное вертикальное воздействие в изотропной горизонтально-слоистой среде не вызывает колебаний на y-компоненте, ортогональной линии источник-приёмник [2,5]. Столь большая интенсивность поперечной волны на y-компоненте при воздействии со всех ПВ однозначно свидетельствуют о влиянии азимутальной анизотропии ВЧР. Сложная, различающаяся на x- и y-компоненте форма колебания, представляющего поперечную волну, обусловлена интерференцией быстрых и медленных волн в анизотропном слое. Различия в форме записи поперечных волн при воздействии с разных выносных ПВ свидетельствуют об изменениях направления поляризации быстрой и медленной поперечной волны и временных задержек между ними, что вызвано латеральной вариацией анизотропных свойств ВЧР [6,7]. При этом стабильность формы импульса поперечной волны, а также то, что до её вступления амплитуда обменных волн на y-компоненте практически отсутствует, указывает на то, что ниже ВЧР среда в месте расположения скважины изотропна.

Обработка данных ВСР

Для подавления волн-спутников и приведения сигнала к короткому нуль-фазовому импульсу, по записям z-компоненты была проведена деконво-



ПОЛЕВОЙ СЕЗОН ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

люция, основанная на оценке формы импульса падающей волны. Результат деконволюции данных с ПВ 3 показан на рис. 4. Видно хорошее подавление волн-спутников продольной волны. Однако близость частот продольных и поперечных волн привела к тому, что падающая поперечная волна и весь фон порождённых ею отражённых волн типа SP имеют интенсивность, вполне сравнимую с продольными волнами. При этом, различия задержек спутников продольной и поперечной волн, деконволюция не только не подавила последние, но и сгенерировала искусственные оси синфазности, дополнительно увеличив уровень регулярных помех после вступления поперечной волны.

Для деконволюции данных x-компоненты с выносных ПВ были использованы формирующие операторы, определённые по вертикальной компоненте. Несмотря на то, что такая процедура, из-за различий относительных интенсивностей волн-спутников на x- и z-компонентах, не вполне корректна, в результате было получено хорошее подавление волн-спутников продольной волны. Результат деконволюции по данным x-компоненты ПВ 3 приведен на рис. 5. Как хорошо видно на этом рисунке, близость частот продольной и поперечной волн сделало падающую поперечную волну на x-компоненте, после такой процедуры, существенно более интенсивной, чем продольная, что породило крайне интенсивный фон отражённых поперечных волн, генерируемых как непосредственно падающей поперечной волной, так и её спутниками.

По записям y-компоненты с выносных ПВ также была проведена деконволюция. Несмотря на то, что импульс падающей поперечной волны имеет довольно сложную форму, образованную под влиянием анизотропии ВЧР, в процессе распространения эта форма остаётся стабильной и сохраняется в сигнале отражённых поперечных волн. Это позволило получить оценку формы импульса падающей поперечной волны и вычислить формирующие операторы, приводящие этот сложный сигнал к короткому нуль-фазовому импульсу. Результат деконволюции по данным y-компоненты ПВ 3 приведен на рис. 6, демонстрирующим хорошее подавление волн-спутников падающих и отражённых поперечных волн.

Тем не менее, кратные волны с большой задержкой после деконволюции y-компоненты сохранились. Этот эффект связан с непараллельностью годографов отражённых волн при большом выносе ПВ и всегда отмечается при обработке данных ВСР. Подавление таких кратных волн при обработке выносных ПВ представляет собой пока не решённую в мире задачу. Несомненно, результаты деконволюции по x- и z-компонентам также содержат подобную помеху, но она не выделяется на фоне гораздо более сильных помех, связанных с поперечными волнами.

Разделение волновых полей ВСР проводилось параметрическим методом в частотной области по заданным годографам волн. Это позволило получить поля нисходящих и восходящих продольных, обменных и поперечных волн. На рис. 7 представлено выделенное поле восходящих продольных волн по z-компоненте с ПВ 3. Видно, что после времени вступления поперечной волны, в этом поле присутствуют отражённые SP-волны. На вертикальном профиле значения кажущейся скорости отражённых продольных и обменных SP-волн близки, что приводит к невозможности разделения этих волн процедурами многоканальной фильтрации. На рис. 8 показано выделенное

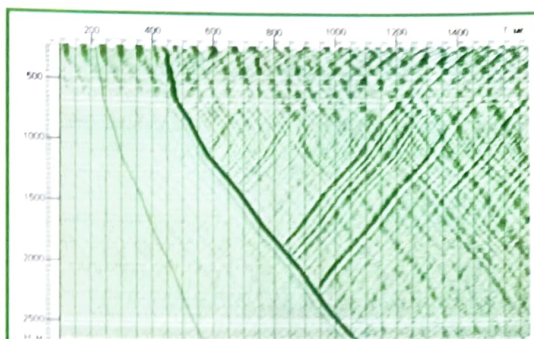


Рис. 6. Скважина Ом-11, ПВ 3, y-компонента. Деконволюция к импульсу Рикера с периодом 32 мс по полю падающих продольных волн

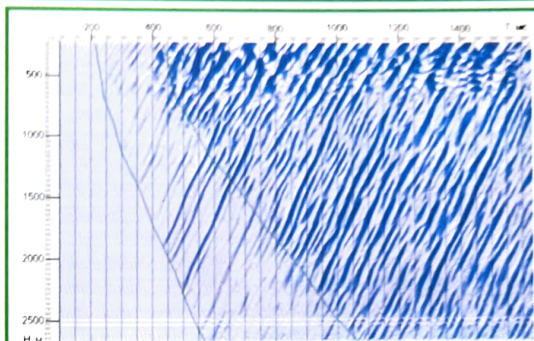


Рис. 7. Скважина Ом-11, ПВ 3, z-компонента. Поле восходящих продольных волн, после деконволюции к импульсу Рикера с периодом 25 мс

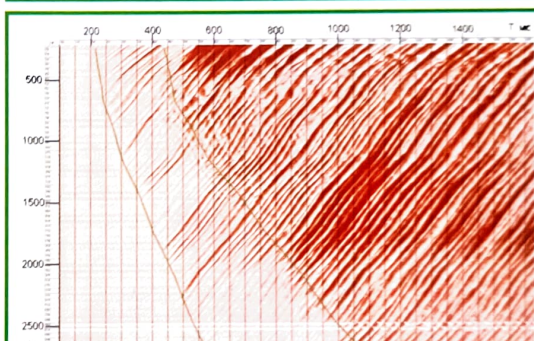


Рис. 8. Скважина Ом-11, ПВ 3, x-компонента. Поле восходящих поперечных волн, после деконволюции к импульсу Рикера с периодом 25 мс

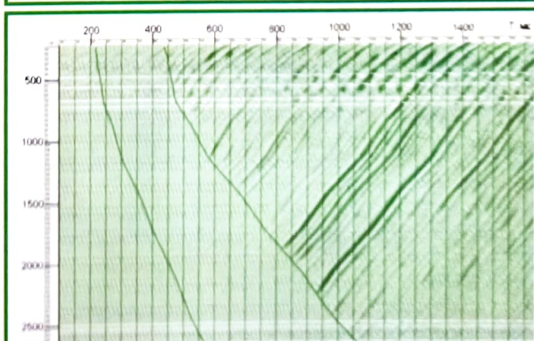


Рис. 9. Скважина Ом-11, ПВ 3, y-компонента. Поле восходящих поперечных волн, после деконволюции к импульсу Рикера с периодом 25 мс

поле восходящих обменных PS-волн по x-компоненте с ПВ 3, на котором также присутствуют регулярные помехи. В данном случае это отражённые поперечные волны, появляющиеся после вступления падающей поперечной волны и

имеющие кажущиеся скорости, близкие к выделяемым PS-волнам. По данным у-компоненты с выносных ПВ также было проведено разделение волновых полей и получены сейсмограммы отражённых поперечных волн, максимально свободные от регулярных помех. Поле восходящих поперечных волн, полученное по данным с ПВ 3, показано на рис. 9.

Анализ поляризации падающих поперечных волн, проведённый по каждому из ПВ в интервале глубин ниже минимума годографа, показал, что параметры поляризации остаются практиче-

ски постоянными во всём проанализированном интервале. При этом азимуты поляризации в быстрой поперечной волне, определённые по разным ПВ, оказались существенно различны. Временной сдвиг между быстрой и медленной волной во всех случаях составил 6–8 мс. Стабильность параметров поляризации по глубине, а также линейная поляризация обменных волн в плоскости источник-приёмник, свидетельствуют об отсутствии азимутальной анизотропии в данном разрезе ниже ВЧР. При этом параметры анизотропии ВЧР оказываются различными в местах расположения разных ПВ, что приводит к различию формы импульса возбуждаемых ими поперечных волн.

Разрезы околоскважинного пространства

Построение глубинных разрезов околоскважинного пространства по всем ПВ было выполнено по разработанному в ИНГГ СО РАН алгоритму фокусирующего преобразования путём суммирования по Кирхгофу с контролем угла отражения [3, 8]. Применение данного алгоритма позволяет избежать появления на изображении артефактов, связанных с размытием энергии отражённых волн по эллипсам равных времён. Такое размытие изображения вызывается малой кратностью наблюдений при ВСП и его устранения можно добиться путём ограничения апертуры миграции. В используемом алгоритме это ограничение производится путём задания диапазона допустимых углов наклона отражающих элементов. Задание соответствующих скоростных моделей для расчёта лучей падающих и отражённых волн позволяет проводить такое построение как для отражённых продольных и поперечных, так и для обменных волн.

В результате применения такой процедуры были получены разрезы околоскважинного пространства в направлении на выносные ПВ по продольным, поперечным и обменным PS-волнам.

Разрезы, полученные по данным с ПВ 3 по продольным, обменным и поперечным волнам, представлены на рис. 10–12. Видно, что основные отражающие горизонты хорошо прослеживаются как на продольных, так и на обменных и поперечных волнах. На разрезе, полученном на продольных волнах (рис. 10), наблюдается резкое возрастание количества и амплитуды ложных отражений на удалении 170–200 м (ниже забоя – 220 м) от скважины. Эти артефакты связаны с отражёнными обменными волнами типа SP, которые вызваны присутствием крайне интенсивной поперечной волны на z-компоненте. Имея форму записи, отличную от спутников продольной волны, эти обменные волны не подавляются и

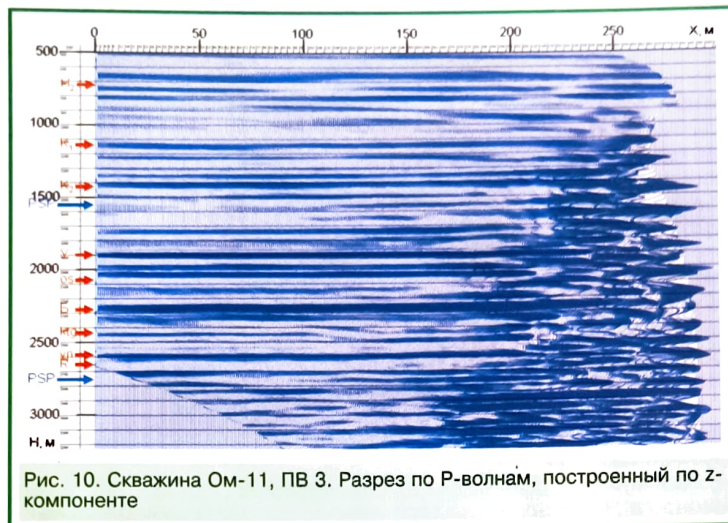


Рис. 10. Скважина Ом-11, ПВ 3. Разрез по Р-волнам, построенный по z-компоненте

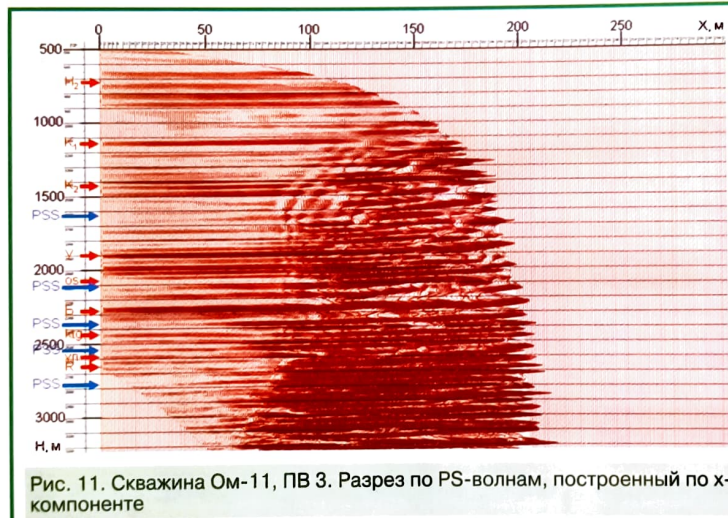


Рис. 11. Скважина Ом-11, ПВ 3. Разрез по PS-волнам, построенный по x-компоненте

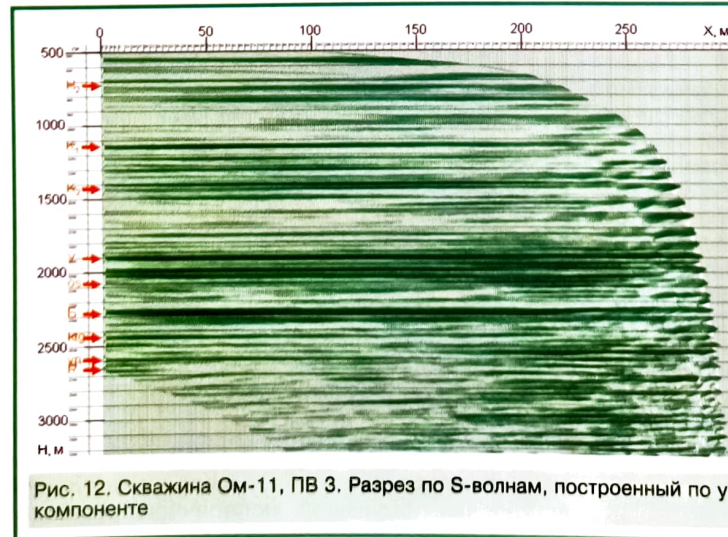


Рис. 12. Скважина Ом-11, ПВ 3. Разрез по S-волнам, построенный по y-компоненте



даже наоборот, усиливаются деконволюцией. Различия же в кажущихся скоростях с отражёнными продольными волнами, проявляющиеся в том, что эти ложные отражения демонстрируют на разрезе заметный угол падения в сторону скважины, оказываются, тем не менее, слишком малы для разделения пространственно-временными фильтрами.

На разрезе, полученном на обменных волнах по данным x -компоненты (рис. 11), также наблюдается резкое возрастание уровня помех на удалении около 100 м, а ниже забоя – 120 м. Здесь проявляются отражёнными монотипные поперечные волны, также порождённые прямой поперечной волной. Эти волны тоже не подавляются деконволюцией и пространственно-временной фильтрацией, хотя имеют несколько отличные от полезных, в данном случае обменных PS -волн, кажущиеся скорости, приводящие к появлению наклонов ложных горизонтов на глубинном разрезе. Кроме них, искажения в разрезе вносят обменные волны типа PSS .

Разрезы, полученные на поперечных волнах по выносным ПВ (рис. 12), характеризуются наименьшей амплитудой ложных отражений и наибольшими размерами области, свободной от них (до 260 м от скважины). Это вызвано более простой волновой картиной на y -компоненте, не содержащей обменные волны. На больших удалениях на них начинают проявляться кратные отражённые монотипные поперечные волны. Эти помехи присутствуют и на разрезах, полученных по z -и x -компонентам, но плохо различимы на фоне более сильных обменных волн.

Сопоставление разрезов, полученных по продольным, обменным и поперечным волнам, показывает, что различие скоростей продольных и поперечных волн приводит к некоторому увеличению разрешённости разрезов обменных и поперечных волн по сравнению с разрезами продольных волн, полученными на той же частоте.

Заключение

Проведённые работы демонстрируют, что вертикальное воздействие источника «Енисей» в анизотропной среде может возбуждать интенсивную падающую поперечную волну, наблюдающуюся на всех трёх компонентах. Это приводит к значительному усложнению волновой картины, наблюдаемой на x - и z -компонентах. В ней имеют значительную интенсивность практически все типы волн – продольные, поперечные, и разнообразие обменные.

В противоположность этому, в случае изотропной горизонтально-слоистой подстилающей толщи, поперечная волна на y -компоненте (SH -волна) не испытывает обмена, что приводит к значительному упрощению волнового поля, содержащего только падающие и восходящие поперечные волны.

Исследование анизотропии разреза показало, что, за исключением ВЧР, разрез в окрестности исследуемой скважины азимутально-анизотропными свойствами не обладает. Анизотропия же ВЧР характеризуется существенной латеральной неоднородностью, что вызывает различие формы импульса поперечных волн, возбуждаемых невзрывным источником при воздействиях с разных ПВ. При профильных наблюдениях это приведёт к изменению формы импульса в пределах одной сейсмограммы ОГТ и

использование поперечных волн, оказавшихся столь эффективными при данных работах ВСП, не даст результат из-за невозможности их синфазного суммирования.

Влияние возбуждаемой невзрывным источником поперечной волны привело к высокому уровню помех на изображениях околоскважинного пространства, полученных по данным с выносных ПВ по продольным и обменным волнам. Однако использование y -компоненты, не содержащей обменные волны, позволило получить разрезы околоскважинного пространства, максимально свободные от ложных осей синфазности.

Такие разрезы отличаются весьма низким уровнем помех благодаря высокой стабильности воздействий, обеспечиваемой импульсным источником по сравнению с взрывным источником.

Близость частот продольных и поперечных волн в данном районе делает разрезы, полученные на поперечных волнах, более высоко разрешёнными, чем разрезы, полученные по продольным волнам на z -компоненте.

Всё это демонстрирует высокую эффективность применения комплекса P , PS и S -волн при ВСП, который даёт более полное представление о строении среды.

Авторы выражают благодарность компании CGG за предоставленную обрабатывающую систему GeovecteurPlus, отдельные процедуры из которой были использованы при обработке данных, и ООО «Красноярскгаздобыча» за разрешение публикации материалов.

Литература

1. Гальперин Е.И. – Вертикальное сейсмическое профилирование. – М.: Недра, 1971г.
2. Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю. и др. – Сейсмическая разведка методов поперечных и обменных волн. – М: Недра, 1985.
3. Горшкалев С.Б., Карстен В.В., Беликов А.Е. и др. – Преимущества многоволнового ВСП на примере данных скважины ТВ-320. //Технологии сейсморазведки. – 2007. – №1. с. 73-79.
4. Муртаев И.С., Детков В.А., Зоммер Б.К. и др. – Электромагнитные источники «Енисей». // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2005. – №2, специальный выпуск.
5. Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Лебедева Г.Н. – Трёхкомпонентная регистрация волн различных типов от симметричных и несимметричных источников//Экспериментальные и теоретические исследования отражённых волн – Новосибирск: Наука, 1975 – с 5-25.
6. Горшкалев С.Б., Карстен В.В., Корсунов И.В. и др. – Опыт использования трёхкомпонентной регистрации волновых полей на Оморинском лицензионном участке. //Геофизика – 2006. – специальный выпуск.
7. S B Gorshkalev, W V Karsten, K A Lebedev et al. – Evidence for rapid variations of azimuthal anisotropy in the near surface: an example from Eastern Siberia, Russia //Journal of Seismic Exploration, – 2007, – v. 16, pp 319-330.
8. Карстен В.В., Черноиванов А.И. – Построение изображения по данным ВСП путём Кирхгофской миграции с контролем угла отражателя //Материалы международной конференции геофизиков и геологов "К эффективности через сотрудничество", г. Тюмень, 2007г.