

Прогнозирование разреза ниже забоя скважины модификациями метода вертикального сейсмического профилирования

Г.А. Шехтман

д.т.н., ведущий научный сотрудник
gregs.geo@yandex.ru

Институт инновационных инженерных технологий
РУДН, Москва, Россия

Возможность прогнозирования геологического разреза ниже забоя скважины отличает метод вертикального сейсмического профилирования (далее — ВСП) от всех других методов геофизических исследований скважин (далее — ГИС). В методе ВСП одновременно регистрируют волны падающие и волны, отраженные от сейсмических границ, расположенных под забоем. Тем самым, в отличие от наземной сейсморазведки, обеспечивается более корректное решение обратных кинематических и динамических задач, нацеленных на изучение разреза ниже забоя. В методе ВСП в настоящее время используется несколько модификаций, каждая из которых обладает рядом достоинств и недостатков. Комбинирование разных модификаций позволяет по кинематическим и динамическим параметрам волн разных типов и классов изучать упругие свойства покрывающей толщи и разреза под забоем скважины.

Материалы и методы

Вертикальное сейсмическое профилирование, экспериментальные и модельные данные.

Ключевые слова

сейсмические скорости, модификации метода ВСП, продольное ВСП, непродольное ВСП, НВСП, ВСП с подвижным источником колебаний, ВСП-ПИ, прогноз скоростей

Сокращение объемов бурения и, в частности, глубин бурящихся скважин делает задачу прогноза геологического разреза ниже забоя скважины крайне актуальной. Возможность прогноза геологического разреза ниже забоя скважины является основным преимуществом метода ВСП перед другими методами ГИС.

Разные модификации метода ВСП обладают присущими им достоинствами и недостатками. Для обоснованного прогноза разреза целесообразно комбинировать разные модификации, зная возможности и ограничения каждой из них [1].

Возможности прогноза разными модификациями метода ВСП

Наиболее популярной модификацией является продольное ВСП (далее — ПВСП), при котором удалением пункта возбуждения (далее — ПВ) от скважины по сравнению с глубиной зонда можно пренебречь. ПВСП успешно применяют при решении методических, геологических и технологических задач. Стратиграфическая привязка отражений, модель скоростей выше забоя скважины, амплитудная инверсия разреза ниже забоя скважины, количественная оценка неупругого затухания — вот далеко не полный список устоявшихся задач, стоящих перед исполнителями работ модификацией ПВСП. Однако изучать геометрию сейсмических границ, а также пластовые скорости в многослойной среде, расположенной под забоем скважины, эта модификация не позволяет. Основная причина — ограниченный участок освещенности

околоскважинного пространства и практически одинаковое влияние на продольные вертикальные годографы мощностей пластов и пластовых скоростей для пластов, расположенных под забоем. Поэтому осуществить глубинную привязку псевдоакустических кривых, полученных с целью прогноза разреза ниже забоя скважины, в рамках ПВСП не удастся. И лишь для расположенной под забоем части пласта, в котором находится забой, можно осуществлять преобразование временного масштаба в масштаб глубинный, а также определять глубину подошвы этого пласта. Прогноз мощности более глубоких пластов, а также пластовых сейсмических скоростей в этих пластах по данным ПВСП невозможен.

Однако несмотря на отмеченные ограничения, вытекающие из неоднозначности решения обратной кинематической задачи для ПВСП, эта модификация позволяет по динамическим характеристикам глубинных отражений судить о природе отражающих границ, а также об условиях выделения отражений от тонких слоев, расположенных под забоем скважины. В простейших случаях даже на этапе экспресс-обработки данных можно по полярности отражений обоснованно судить о знаке смены акустической жесткости границ, расположенных под забоем. Приведем экспериментальный пример по одной из скважин, расположенных в Красноярском крае.

На рис. 1 показаны фрагменты исходной сейсмограммы ВСП до и после применения деконволюции, на которых сильное отражение из-под забоя указано стрелкой. Легко

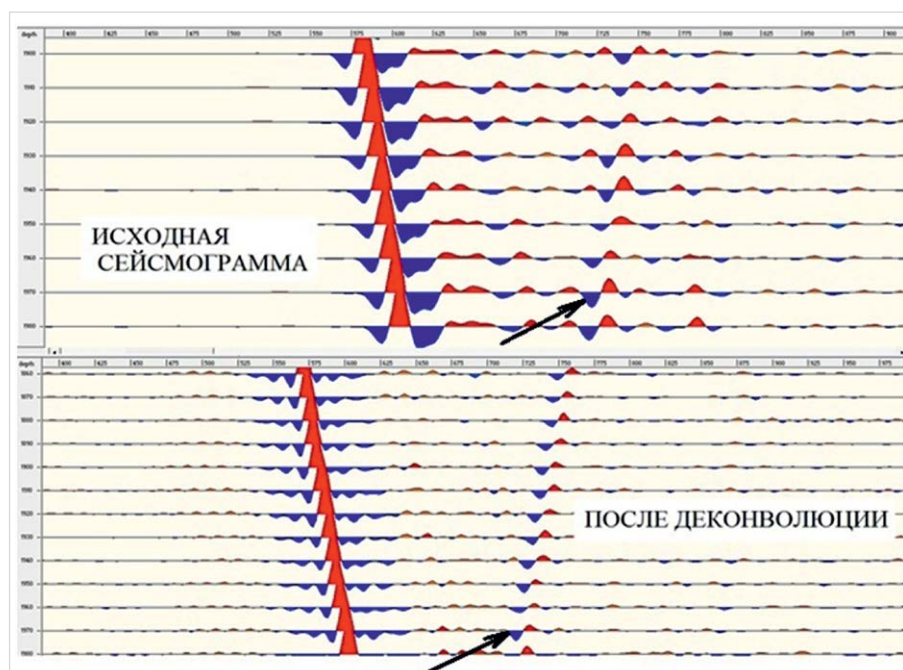


Рис. 1 — Фрагменты сейсмограмм ПВСП. Стрелкой указано отражение из-под забоя от акустически резкой границы.

Fig. 1 — Fragments of the zero offset VSP seismogram. The arrow points the reflection from the acoustic contrast interface under TD

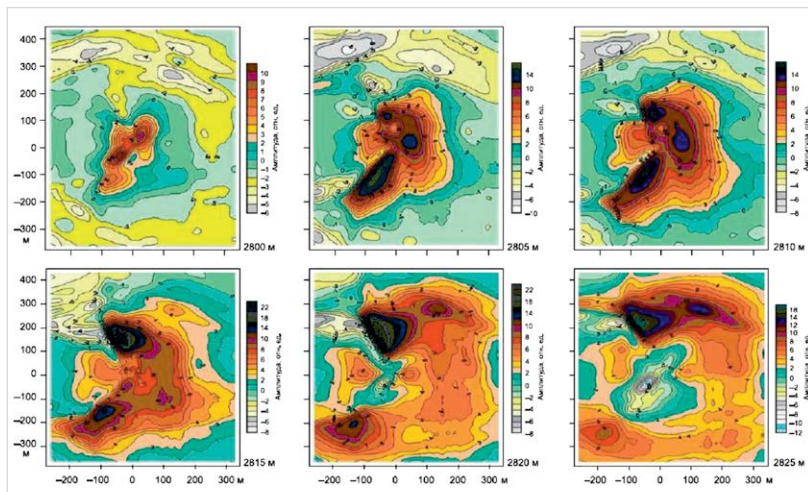


Рис. 2 — Срезы с шагом 5 м по глубине, полученные по глубинным разрезам НВСП на продольных волнах из разноудаленных ПВ, равномерно расположенных в шести азимутах. Западная Сибирь.

Fig. 2 — Slices with 5 m depth step obtained from offset VSP depth sections for compressional waves with different offsets and evenly spaced in six azimuths. Vest Siberia

видеть, что полярность его противоположна полярности прямой волны, что однозначно указывает на то, что это отражение от границы, расположенной на 200 м глубже забоя, связано с положительным скачком акустического импеданса, т.е. отражающая граница на этой глубине является жесткой. Кроме того, близкие по модулю и по времени регистрации значения экстремумов разного знака свидетельствуют о том, что отмеченное отражение произошло от кровли контрастного слоя, резко отличающегося по значению импеданса от вмещающих пород.

Последующая амплитудная инверсия позволила получить количественную оценку акустического импеданса для части разреза, расположенной под забоем. Жесткая граница под забоем скважины в данном случае была проинтерпретирована как кровля траппов, характерных для покрывающей толщи данного района.

Примеры опережающего прогноза рапоопасной зоны (зона аномально высокого пластового давления) в условиях Восточной Туркмении приведены в [1].

Непродольное ВСП (далее — НВСП) применяют при изучении структуры околоскважинного пространства для решения геологических задач. В отличие от ПВСП, НВСП позволяет изучать геометрию границ и определять пластовые скорости ниже забоя скважины. Однако при больших выносах ПВ трудно избежать ошибок при интерпретации данных, частично полученных в области закритических отражений. Переход от закритической к докритической области чреват формированием ложных тектонических нарушений. Кроме того, изменение углов падения сейсмических лучей в большом диапазоне приводит к значительным искажениям результатов в условиях анизотропных сред. Формирование области тени под забоем скважины при проведении НВСП создает большие трудности в увязке данных, полученных с разных ПВ. Однако в условиях сред с субгоризонтальным залеганием

сейсмических границ обработка скважины из многих ПВ, расположенных в разных азимутах, позволяет получить разрезы и срезы, не уступающие по качеству результатам дорогостоящего площадного ВСП. Пример амплитудных срезов высокого качества с шагом 5 м по глубине приведен на рис. 2.

На рис. 3 приведен пример кинематической инверсии данных ВСП в условиях среды с неплоскими границами раздела. Для решения этой задачи использовали вертикальные годографы прямых и отраженных волн. Геологическая задача состояла в изучении кровли коры выветривания фундамента, залегающей в изучаемом районе на небольшой глубине (менее 800 м). Скважина была отработана из одного ближнего и шести выносных ПВ. Удаления от скважины выносных ПВ составляли около 1000 м (существенно больше глубины целевой границы), поэтому попытки получения изображения среды путем миграции записей НВСП оказались не вполне удачными. Основная причина была в том, что от контрастной целевой границы при таких выносах ПВ регистрировались интенсивные закритические отражения, испытывающие при миграции сильные искажения и формирующие при этом ложные объекты на изображении среды [2]. Поэтому кинематическая инверсия в данном случае позволила получить вполне достоверное представление о геометрии целевой границы.

ВСП с подвижным источником (далее — ВСП-ПИ) применяют при решении геологических задач. Разрезы, полученные при проведении ВСП-ПИ с разных азимутов, легко стыкуются между собой, поскольку под забоем не формируется область тени. Меньшие углы падения волн в данной модификации по сравнению с НВСП практически исключают опасность формирования ложных объектов на изображениях, полученных для глубоких целевых границ. Поэтому достоверность выделения тектонических нарушений достаточно высока. Экспериментальные результаты, полученные модификацией ВСП-ПИ в

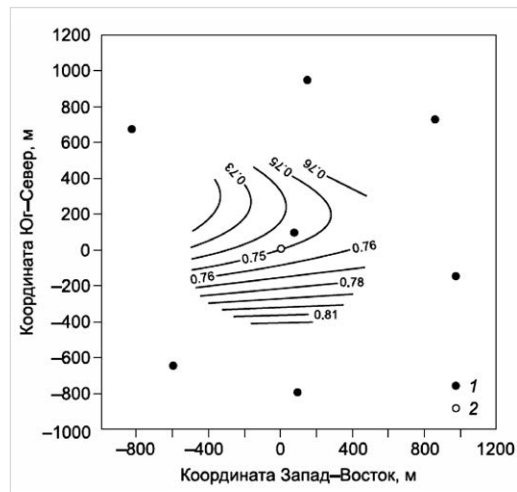


Рис. 3 — Структурная схема по кровле коры выветривания фундамента, полученная путем кинематической инверсии данных ВСП (Юго-Западная Сибирь):

1 — пункты возбуждения, 2 — скважина
Fig. 3 — Structural scheme for the roof of the weathering crust of the basement, obtained by kinematic inversion of the VSP data (South-Western Siberia):
1 — shotpoints, 2 — the borehole

районах с разными геологическими условиями, убедительно подтверждают возможности изучения околоскважинного пространства данной модификацией. Сопоставление разрезов, полученных путем миграции записей НВСП и ВСП-ПИ, свидетельствует в пользу последних. На рис. 4 сопоставляются два глубинных разреза, полученных при проведении НВСП и ВСП-ПИ на одном из участков в центральном районе России, где проводили исследования с целью изучения сплошности среды (работы для локализации подземных хранилищ газа). Видно, что на разрезе ВСП-ПИ отражающие границы прослеживаются более устойчиво, и отсутствует зона тени, характерная для разрезов НВСП.

Более высокая разреженность разрезов ВСП-ПИ обусловлена тем, что вблизи целевых границ волны падают субвертикально, поэтому затухают они меньше по сравнению с аналогичными волнами, падающими под максимальными углами при НВСП. Субвертикальное падение волн является, однако, определенным ограничением при проведении ВСП-ПИ на обменных отраженных волнах. При НВСП интенсивность этих волн гораздо выше, чем при ВСП-ПИ.

Интерес к изучению трещинных коллекторов обусловил появление модификации **кругового ВСП** (далее — КВСП). Трехкомпонентные записи КВСП позволяют по соотношениям интенсивности главных и побочных компонент намечать направления, соответствующие направлениям оси симметрии и плоскости симметрии для моделей с вертикальной трещиноватостью типа НТЛ. Последующее использование интенсивности обменных отраженных волн, зарегистрированных вдоль направлений с минимальным отношением интенсивности записи побочной компоненты к интенсивности записи радиальной компоненты позволяет определить азимут простираения трещиноватой зоны [3].

Весьма ценную информацию о поведении продуктивного коллектора можно получить, используя такие атрибуты, как амплитуда максимума импульса отраженной волны и

частота максимума спектра этого импульса. На рис. 5 приведены карты по этим атрибутам для одного из участков Западной Сибири. Можно видеть, что конфигурации аномальных зон, оконтуренных повышенными

значениями амплитуд и пониженными значениями частот, достаточно близки. Эти зоны соответствуют повышенным мощностям продуктивного коллектора, являющегося контрастным слоем. Именно этим и объясняется

подобный характер динамических атрибутов волны, отраженной от этого слоя.

Определение сейсмических скоростей ниже забоя скважины

Вопрос о прогнозировании сейсмических скоростей ниже забоя скважины заслуживает особого внимания. Дело в том, что формальное решение обратной кинематической задачи (кинематической инверсии) по данным ВСП в силу некорректности решения приводит к неоднозначности. Среднеквадратичная оценка значений полученных пластовых скоростей и глубин сейсмических границ, расположенных ниже забоя, еще не характеризует реальной точности определения этих параметров, а свидетельствует лишь о сходимости решения. При этом возникают два чисто методических вопроса: 1) какова же реальная точность определения искомых параметров при использовавшейся системе наблюдений? 2) Какая система наблюдений смогла бы обеспечить заданную точность определения этих параметров? Кроме того, возникает вопрос о том, какие параметры покрывающей толщи могут быть зафиксированы при прогнозе скоростей ниже забоя скважины? Последний вопрос правомерен в условиях изменчивой ВЧР, поскольку фиксируют обычно пластовые скорости, полученные при ПВСП, а для прогноза ниже забоя скважины привлекают данные НВСП, полученные при других поверхностных условиях.

Рассмотрим вначале вопрос о влиянии изменчивой ВЧР на результаты прогноза скоростей.

На рис. 6 приведены результаты определения скорости в верхнем слое по данным ВСП-ПИ. Скорость определяли путем кинематической инверсии по годографам проходящей волны при зафиксированных параметрах всех нижележащих пластов, полученных с ближнего к скважине пункта возбуждения (ПВ).

Можно видеть, что скорость в верхнем слое вдоль профилей ВСП-ПИ изменяется почти вдвое. Она имеет минимальное значение вблизи скважины в окрестности ближнего ПВ. При кинематической инверсии по данным НВСП скорость в этом слое была взята равной 4000 м/с. Именно при такой скорости

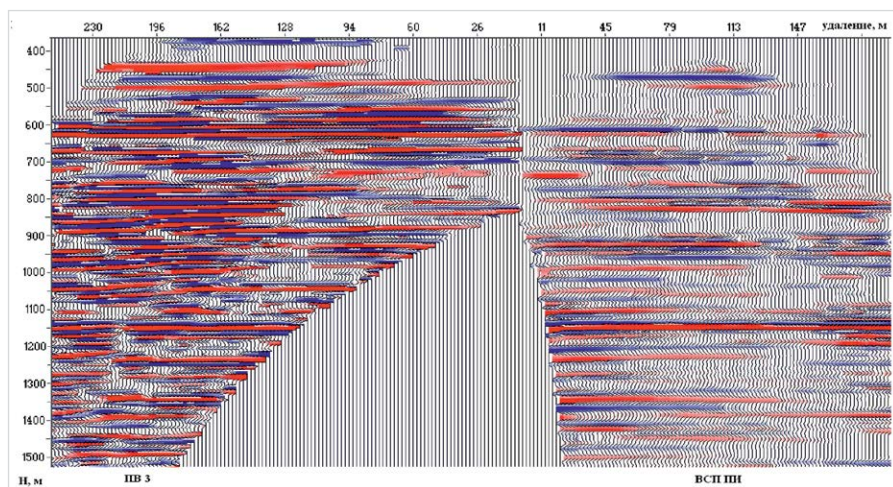


Рис. 4 — Сопоставление глубинных разрезов НВСП (слева) и ВСП-ПИ (справа)
Fig. 4 — Comparison of deep sections of offset VSP (left) and moving source VSP (right)

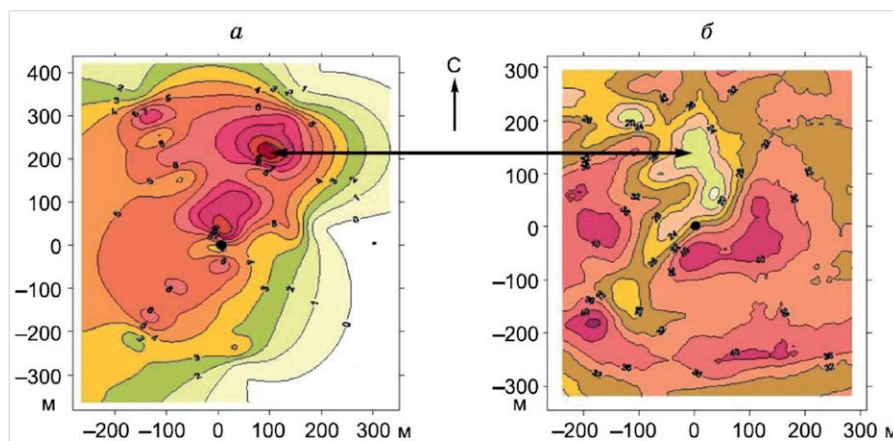


Рис. 5 — Карты амплитуд целевого отражения (а) и частоты максимума спектра отражения (б). Стрелкой соединены зоны аномальных значений атрибутов, соответствующих повышению мощности коллектора.

Fig. 5 — Maps of the amplitudes of target reflection (a) and the frequency of the maximum of the reflection spectrum (b). The arrow connects the zones of anomalous attribute values corresponding to the collector thickness increase

Параметры		Скорость в верхнем слое ВЧР										
		2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600
Пластов. скор. под забоем, м/с	V1	w4123 ±124	4009 ±103	3909 ±84	3904 ±71	3840 ±58	3755 ±47	3751 ±38	3736 ±35	3681 ±38	3644 ±47	3616 ±58
	V2	3105 ±276	3174 ±226	3189 ±186	3168 ±156	3184 ±130	3189 ±105	3188 ±85	3188 ±78	3190 ±87	3189 ±107	3188 ±132
	V3	4738 ±395	4740 ±330	4742 ±272	4740 ±228	4742 ±190	4742 ±153	4742 ±124	4741 ±113	4741 ±120	4741 ±153	4740 ±189
Глубина границы под забо- ем, м	H1	2219 ±14	2212 ±11	2205 ±9	2208 ±8	2205 ±6	2198 ±5	2200 ±4	2200 ±4	2197 ±4	2194 ±5	2193 ±7
	H2	2633 ±38	2636 ±31	2631 ±26	2632 ±22	2630 ±18	2624 ±15	2626 ±12	2627 ±11	2623 ±12	2621 ±15	2619 ±19
	H3	2904 ±40	2906 ±33	2902 ±27	2902 ±23	2901 ±19	2895 ±15	2897 ±12	2898 ±12	2894 ±13	2892 ±16	2890 ±19
Ср. кв. откл. набл. и теор. годографов, мс		16.1	13.5	11.3	9.5	8.0	6.5	5.3	4.8	5.4	6.7	8.3

Таб. 1 — Варианты кинематической инверсии вертикальных годографов прямых и отраженных волн для разных скоростей в верхнем слое

Tab. 1 — Variants of kinematic inversion of vertical hodographs of direct and reflected waves for different velocities in the upper layer

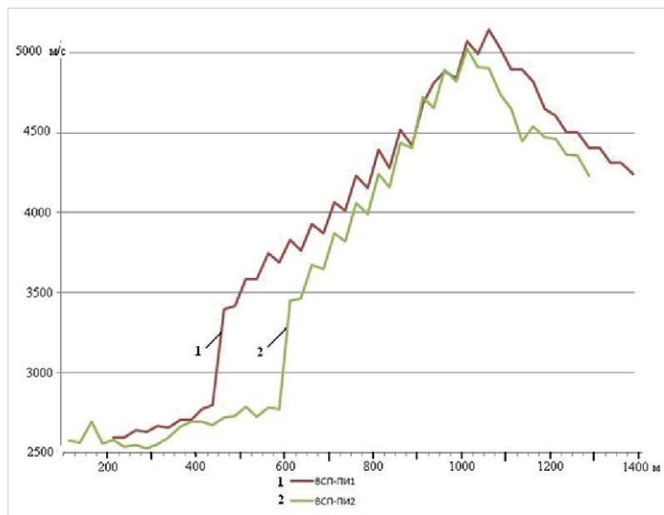


Рис. 6 — Изменение пластовой скорости в верхнем слое вдоль профилей ВСП-ПИ
Fig. 6 — Change of the layer velocity in the upper layer along the moving source VSP lines

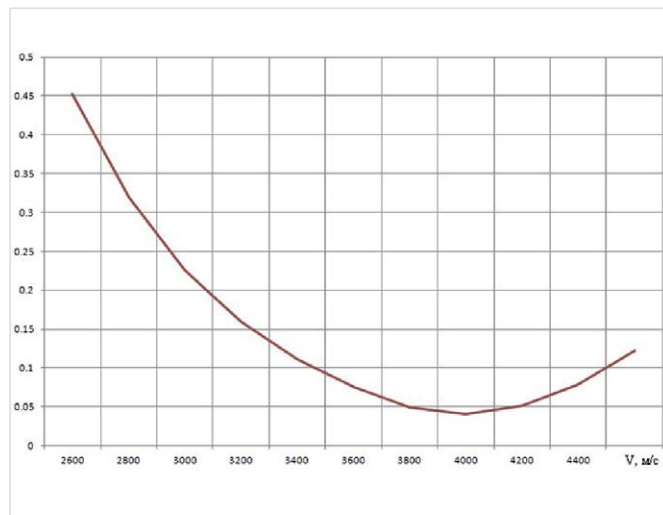


Рис. 7 — Поведение целевой функции в зависимости от скорости в верхнем слое при кинематической инверсии с целью прогноза скоростей ниже забоя скважины
Fig. 7 — The behavior of the objective function depending on the velocity in the upper layer at the kinematic inversion in order to predict the velocities below the TD

целевая функция при кинематической инверсии имеет минимум, т.е. данная скорость оказалась оптимальной (рис. 7).

Ниже в таб. 1 представлены варианты кинематической инверсии вертикальных годографов прямых и отраженных волн для разных значений скоростей в верхнем слое. В качестве неизвестных были подошвы трех расположенных под забоем пластов и пластовые скорости в них. Пластовые скорости и глубина подошв пластов обозначены соответственно V1, V2, V3 и H1, H2, H3.

Видно, что среднеквадратическое отклонение между наблюдаемыми и теоретическими годографами для разных значений скорости в верхнем слое достигает минимума при значении, равном 4000 м/с. Существенно, что значение скорости в этом слое вблизи ближнего ПВ (т.е. при ПВСП) в полтора раза меньше. Можно видеть, что при значении

4000 м/с погрешности в определении пластовых скоростей, а также глубины границ, соответствующих подошвам этих пластов, оказались минимальны. Сочетание моделей, полученных при ПВСП и НВСП, позволило в данном случае получить скоростную модель для интервала среды, пересеченного скважиной, а также под ее забоем. Эти данные затем были использованы для преобразования масштаба времен в масштаб глубин для акустических жесткостей под забоем скважины, а также для изображений среды, полученных путем миграции данных ВСП.

Рассмотрим влияние выноса при НВСП на результаты кинематической инверсии. В условиях рассматриваемой модели для этого было выполнено математическое моделирование. Были рассчитаны теоретические годографы продольных отраженных волн, приуроченных к подошвам трех рассматриваемых

пластов при выносах ПВ, равных 700 м и 1200 м. Затем по этим годографам была выполнена кинематическая инверсия. Результаты прогноза представлены ниже в таб. 2. Видно, что погрешности в определении глубины подошвы пласта под номером 12 (самого глубокого) и пластовой скорости в нем максимальны.

Моделирование также было выполнено для большей апертуры наблюдений, соответствующей выносу ПВ, равного 3000 м. Результаты кинематической инверсии приведены в таб. 3. Как и следовало ожидать, погрешность определения искомых параметров резко уменьшилась. В частности, различие между заданной при моделировании пластовой скоростью наиболее глубокого пласта и скоростью, определенной путем инверсии, составило лишь 0,5%, в то время как при выносах 700 м и 1200 м оно достигало 18,6%.

Номер пласта	Глубина подошвы пласта, м	Пласт. скор., м/с	Прогноз глубины границы, м	Разность глубин, м	Различие глубин, %	Прогноз пластовой скорости, м/с	Разность скоростей, м/с	Различие скоростей, %
10	2200	3750	2204	4	0.2	3794	44	1.2
11	2600	3200	2600	0	0	3171	29	0.9
12	3000	4750	3076	76	2.5	5632	882	18.6

Таб. 2 — Результаты прогноза для выносов 700 м и 1200 м путем кинематической инверсии по теоретическим годографам волн, отраженных от границ ниже забоя скважины

Tab. 2 — The results of the forecast for offsets 700 m and 1200 m by kinematic inversion of the theoretical time-depth curves of waves reflected from the boundaries below the TD

Номер пласта	Глубина подошвы пласта, м	Пласт. скор., м/с	Прогноз глубины границы, м	Разность глубин, м	Различие глубин, %	Прогноз пластовой скорости, м/с	Разность скоростей, м/с	Различие скоростей, %
10	2200	3750						
11	2600	3200						
12	3000	4750	2981	19	0.6	4843	23	0.5

Таб. 3 — Результаты прогноза для выноса 3000 м путем кинематической инверсии по теоретическому годографу волны, отраженной от границы на глубине 3000 м

Tab. 3 — Forecast results for the offset of 3000 m by kinematic inversion of the theoretical time-depth curve of the wave reflected from the boundary at the depth of 3000 m

Итоги

При прогнозировании параметров разреза ниже забоя скважины, основанном на кинематической инверсии, требуется оценка точности полученных параметров. Автор предлагает новый подход к такой оценке, опирающийся на инверсию результатов математического моделирования для модели, параметры которой близки к параметрам экспериментальной модели. Такой же подход возможен при выборе параметров системы наблюдений, апертюра которой может обеспечить требуемую точность определяемых параметров. На точность прогноза также влияет изменчивость ВЧР, которую следует учитывать.

Выводы

1. В полном объеме осуществлять прогноз части геологического разреза, расположенного под забоем скважины, можно лишь путем комплексирования разных модификаций метода ВСП.

2. Применение продольного ВСП позволяет прогнозировать глубину лишь одной отражающей границы, являющейся подошвой пласта, в котором расположен забой скважины.

3. Использование амплитудной инверсии позволяет прогнозировать знаки скачков акустического импеданса для слоев, расположенных под забоем скважины, однако точная глубинная привязка импедансов за пределами пласта, содержащего забой, практически исключена.

4. Применение непродольного ВСП позволяет путем кинематической инверсии определять геометрию границ и пластовые скорости в пластах, расположенных под подошвой пласта, в котором расположен забой. Использование полученных при этом пластовых скоростей позволяет преобразовать временной масштаб в глубинный масштаб при определении акустических импедансов ниже забоя скважины.

5. Формирование изображений среды по данным ВСП-ПИ позволяет получить более надежные результаты о структуре околоскважинного пространства по сравнению с изображениями, полученными при проведении НВСП.

Литература

1. Шехтман Г.А. Вертикальное сейсмическое профилирование. М.: ЕАГЕ Геомодель, 2017. 284 с.
2. Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Попов В.В. Модификации метода ВСП: какую предпочесть? // Технологии сейсморазведки. 2004. № 1. С. 75–79.
3. Шехтман Г.А., Баяк И.О. Модели реальных сред в технологиях метода вертикального сейсмического профилирования // Технологии сейсморазведки. 2015. № 2. С. 59–68.

ENGLISH

GEOPHYSICS

UDC 550.3

Prediction of the cross section below the TD by means of the versions of the VSP method

Author

Gregory A. Shekhtman — Sc.D., leading researcher; gregs.geo@yandex.ru

Innovative Engineering Technology Institute of the RUDN university, Moscow, Russian Federation

Abstract

The possibility of prediction of the geologic section below the TD distinguishes the method of vertical seismic profiling (VSP) from all other methods of geophysical researches of wells. In the VSP method the incident waves and waves reflected from the seismic boundaries, located under the well bottom, are recorded simultaneously. Thus, in contrast to surface seismic exploration, a more correct solution of the inverse kinematic and dynamic problems, aimed for the study of the section below the well bottom, is provided. Several versions of the VSP method are currently used, each of which has a number of advantages and disadvantages. The combination of different versions allows one to study the elastic properties of the subsurface and the section under the bottom of the well by using of kinematic and dynamic parameters of waves of different types and classes.

Materials and methods

Vertical seismic profiling, experimental and model data.

Keywords

seismic velocities, modifications of the VSP method, zero-offset VSP, offset VSP, moving source VSP, forecast of velocities

Results

Predicting the parameters of the section below the well bottom, based on the kinematic inversion, requires an assessment of the accuracy of the obtained parameters. The author proposes a new approach to such estimation based on the inversion of the results of mathematical modeling for the model with parameters close to the parameters of the experimental model. The same approach is possible when choosing the parameters of the observation system, the aperture of which can provide the required accuracy of the required parameters. The accuracy of the forecast is also affected by the variability in the near-surface section, which should be taken into account.

Conclusions

1. The forecast of a part of the geological

section located under the TD can be carried out in full scope only by combining different modifications of the VSP method.

2. The use of zero-offset VSP allows predict the depth of only one reflecting boundary, which is the bottom of the layer, in which the well bottom is located.
3. The use of amplitude inversion makes it possible to predict the signs of acoustic impedance jumps for the layers located under the TD but the exact depth tie of the impedances outside the formation containing the well bottom is practically excluded. The use of offset VSP allows by kinematic inversion to determine the geometry of the boundaries and velocities in the layers located under the layer in which the well bottom is located.
4. Using the resulting layer velocities allows to convert the time scale to depth scale in the determination of acoustic impedances below the TD.
5. The forming of images of the medium according to moving source VSP allows to obtain more reliable results about the structure of the near-well space in comparison with the images obtained from offset VSP.

References

1. Shekhtman G.A. *Vertikal'noe seysmicheskoe profilirovanie* [Vertical Seismic Profiling]. Moscow, EAGE Geomodel Company, 2017, 284 p.
2. Shekhtman G.A., Kuznetsov V.M., Popov

V.V. *Modifikatsii metoda VSP: kakuyu predpochest'?* [Versions of the VSP method: which to prefer?] // Seismic exploration technologies, 2004, issue 1, pp. 75–79.

3. Shekhtman G.A., Bajuk I.O. *Modeli*

real'nykh sred v tekhnologiyakh metoda vertikal'nogo seysmicheskogo profilirovaniya [Subsurface models in technologies of the vertical seismic profiling method] // Seismic exploration technologies, 2015, issue 2, pp. 59–68.