



ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ МЕТОДОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Г.А. Шехтман

ООО “Геофизические системы данных”,
117198, Москва, Ленинский просп., 113/1, Парк Плейс, офис Е-321, Россия, e-mail: gregs22@rambler.ru

Пластовые, средние и интервальные скорости, изучаемые методом ВСП, являются единственным достоверным источником скоростей, необходимых наземной сейсморазведке. Высокая точность определения скоростей может быть достигнута путем использования современных подходов, опирающихся на методы оптимизации, а не на устаревшие подходы, основанные на приведении вертикальных непродольных годографов к вертикали в предположении однородной среды между источником и приемником колебаний. Сопоставлены результаты решения обратной кинематической задачи и изображения среды, полученные в условиях сложно построенных геологических сред. Показано, что определение пластовых скоростей совместно с геометрией преломляющих и отражающих границ позволяет избежать абсурдных результатов, проявляющихся в нестыковке результатов с различных пунктов возбуждения. Приведены примеры определения интервальных скоростей методом ВСП с детальностью, приближающейся к детальности АК и максимально возможной детальности наземной сейсморазведки.

Сейсмокаротаж, метод ВСП, пластовая скорость, интервальная скорость, обратная кинематическая задача

LINES OF ATTACK ON THE PROBLEM OF ACCURACY INCREASING IN STUDIES OF SEISMIC VELOCITIES IN THE VERTICAL SEISMIC PROFILING METHOD

G.A. Shekhtman

“Geophysical Data Systems” Ltd.,
Office E-321, Leninsky prosp., 113/1, Park Place, Moscow, 117198, Russia, e-mail: gregs22@rambler.ru

Layer, average and interval velocities which are studied with the VSP method are the only plausible source of velocities which are necessary for surface seismic. High accuracy of determining of the velocities can be attainable by means of up-to-day approaches based on optimizing methods but not on out-dated approaches based on reduction of the offset time-depth curve to the zero-offset one under the assumption of medium homogeneity between vibration source and receiver. Results of kinematic inversion are correlated with the medium image, both are obtained for a complex constructed geological media conditions. It was shown that joint determining of layer velocities together with the geometry of refracting and reflecting boundaries allows avoiding absurd results which show up as un-interfacing of results from different shot points. Examples of interval velocities determination by means of VSP method are shown with detailing which approaches to one of the sonic log and of the maximum feasible detailing of the surface seismic.

Check-shot, VSP method, layer velocity, interval velocity, kinematic inversion

ВВЕДЕНИЕ

Изучение сейсмических скоростей является одной из основных задач наземной и скважинной сейсморазведки. В методе вертикального сейсмического профилирования (ВСП) определение скоростей входит в группу *методических задач*, направленных на повышение эффективности наземной сейсморазведки. Сейчас для всех очевидно, что без знания скоростей, получаемых методом ВСП (ранее – путем проведения сейсмокаротажа), принципиально невозможно достоверно определить по данным одной лишь наземной сейсморазведки набор параметров анизотропии скоростей, необходимых для корректной обработки и интерпретации сейсмических материалов. Более того, давно установленный И.И. Гурвичем [1] факт возможности преобразования анизотропной модели среды в эквивалентную ей изотропную модель вообще

исключает принципиальную возможность преобразования в масштаб глубин одних лишь наземных результатов, полученных в масштабе времен в условиях анизотропной модели. Но даже и при решении *геологических задач*, состоящих в изучении околоскважинного пространства непосредственно методами скважинной сейсморазведки, высокая точность определения скоростей является неперенным условием получения достоверных результатов. Все большую поддержку в мире получает такое общепризнанное направление, как *скважинно-наземная сейсморазведка*, и трудно согласиться с утверждением о том, что при изучении анизотропии скоростей роль метода ВСП оценивают как *вспомогательную* [2]. При решении именно этой задачи роль ВСП без всяких скидок можно расценивать как *ведущую*.

До создания метода ВСП сейсмические скорости распространения продольных волн (скорости V_p) определяли в скважинах по первым вступлениям прямой волны, регистрируемой при сейсмокаротаже. Потребность в скоростях распространения поперечных волн (скоростей V_s) обусловила появление *корреляционного сейсмического каротажа* (КСК) на поперечных волнах [3] едва ли не раньше, чем стала известной аббревиатура ВСП. Более того, оказалось, что требования к контакту скважинного прибора со стенкой скважины при проведении КСК еще более строгие, так как эти работы проводили исключительно трехкомпонентными зондами, в отличие от внедрявшихся вначале в производство в больших объемах наблюдений ВСП многоточечными однокомпонентными зондами. С годами эти два направления – КСК и ВСП – слились в одно, и в настоящее время ВСП является многоволновым, или многокомпонентным, методом, а однокомпонентные наблюдения давно стали редкостью. Скважинные сейсмические наблюдения все чаще проводят многоточечными трехкомпонентными зондами, число модулей (приборов) в которых достигает десятков и даже сотен. Необходимость в многократных возбуждениях сейсмических колебаний на каждом пункте возбуждения (ПВ) в таких случаях отпадает. Однако стоимость такой аппаратуры весьма высока, и большинство отрядов ВСП, по крайней мере, в России, в настоящее время работает трехкомпонентными зондами отечественного производства. Поэтому использование источников, способных обеспечить многократное возбуждение стабильных сигналов, продолжает оставаться актуальным. В то же время реальность заставляет уделять большое внимание учету нестабильности источников колебаний, проявляющейся прежде всего в появлении на записях от разных сейсмических воздействий статических сдвигов, отрицательно влияющих на точность определения скоростей и на прослеживаемость полезных волн в целом.

В настоящее время в методике определения сейсмических скоростей методом ВСП обозначилось два направления. Одно из них предполагает формирование *толстослойной модели* с последующим определением скоростей в каждом из выделенных пластов. Наземную сейсморазведку вполне устраивает информация о пластовых скоростях, а также средних скоростях, рассчитанных непосредственно по вступлениям прямых волн, регистрируемых внутри среды, либо полученных путем пересчета пластовых скоростей в средние скорости.

Второе направление предполагает формирование *тонкослойной модели*, максимально приближенной к результатам акустического каротажа (АК). Целесообразность развития этого направления не вполне очевидна. Сомнения обычно порождает принципиальная недостижимость в методе ВСП такой же вертикальной разрешенности, как и в методе АК. Однако столь высокая разрешенность для сейсморазведки является явно избыточной, поэтому модели, получаемые по данным АК и предназначенные для расчетов в сейсморазведке, умышленно закругляют, по существу приближая их к детальным скоростным моделям, достижимым в методе ВСП [4]. Касаясь предпочтительности для сейсморазведки одной из конкурирующих детальных моделей, представленных соответственно методами АК и ВСП, следует учитывать тот немаловажный факт, что времена вступлений прямой волны,

регистрируемой при ВСП, могут быть существенно завышены по сравнению с интегральными временами, полученными по данным АК. Происходит это из-за дисперсии скоростей, затухания, а также наложения короткопериодных кратнo-отраженных волн [5]. Учитывая это, для глубинной привязки данных наземной сейсморазведки больше подходят именно результаты ВСП, а не АК.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ В ТОЛСТОСЛОИСТЫХ МОДЕЛЯХ

Формирование толстослойных моделей начинается с локализации границ выделяемых пластов. Процедура выделения сейсмических границ по вертикальным годографам прямых волн, регистрируемых в первых вступлениях, не раз пытались формализовать, и делали это довольно успешно. Кроме того, для определения положения границ толстых пластов использовали разбиение на участки однородности графиков интервальных скоростей, полученных по данным АК и ВСП. С этой же целью пытались применять динамические характеристики волн, регистрируемых в первых вступлениях и в последующей записи. Однако все эти способы уступают по надежности способу разбиения редуцированных вертикальных годографов, которые отличаются более крупным (в несколько раз!) масштабом по сравнению с исходными годографами. Впервые для этих целей редуцированные годографы применил Ю.Г. Юров (1983, устное сообщение).

Процедура преобразования продольного или не-продольного вертикального годографа в годограф редуцированный предельно проста. Она состоит в вычитании из наблюдаемых времен значений, вычисленных путем определения тренда между самой верхней и самой нижней точками вертикального годографа. Сопоставление редуцированных годографов с различных пунктов возбуждения позволяет уверенно разделить случайные и систематические факторы, влияющие на локализацию границы между соседними пластами.

Если в нижней части разреза имеется сейсмическая граница, от которой вдоль вертикального профиля уверенно прослеживается отражение, то можно использовать разностные вертикальные годографы. Существенно, что при формировании разностных вертикальных годографов путем вычитания на одной и той же глубине времени прихода прямой продольной волны из времени прихода отраженной волны устраняются статические сдвиги, содержащиеся в записях от различных воздействий. Убедительные примеры использования разностных редуцированных вертикальных годографов нами уже приводились, и тогда же была описана процедура автоматического определения статических сдвигов в записях, полученных от различных воздействий при проведении ВСП различными модификациями метода [6].

Таким образом, можно считать, что с разбиением вертикальных годографов на пласты, различающиеся сейсмическими скоростями, а также с учетом статических сдвигов, вызванных различными воздействиями источников колебаний, в настоящее время существенных проблем нет. Сложнее ситуация с параметризацией модели, для которой определяют пластовые скорости. Приведу пример.

Скважина № 32, пробуренная в Казахстане на участке Жанажол, была отработана из четырех ПВ.

Таблица 1

Пластовые скорости, полученные в предположении горизонтально-слоистой среды

Номер пласта	Глубина подошвы, м	Пластовые скорости, м/с			
		ПВ1	ПВ2	ПВ3	ПВ4
3	900	2360 ± 12	2340 ± 8	2350 ± 13	2320 ± 8
4	1700	3120 ± 20	3100 ± 22	3070 ± 22	4700 ± 35
5	2200	3900 ± 46	3510 ± 44	3730 ± 46	7800 ± 160
6	Ниже забоя	4510 ± 18	4276 ± 17	4400 ± 23	5210 ± 70

Ближний ПВ находился на расстоянии 100 м от устья скважины; ПВ2, ПВ3 и ПВ4 – на расстоянии 1200 м от скважины на запад, на юг и на восток соответственно. В табл. 1 приведены результаты определения пластовых скоростей по одиночным вертикальным годографам в предположении изотропной горизонтально-слоистой среды.

Из табл. 1 видно, что скорости, определенные по прямой волне методом оптимизации, в целом характеризуются невысокими среднеквадратическими погрешностями. Однако значения скоростей, рассчитанные для одних и тех же пластов с различных ПВ, существенно различаются между собой. В пласте № 5 пластовая скорость, определенная с ПВ4, оказалась вдвое(!) выше, чем с ПВ1, а в пласте № 4 – более чем в полтора раза выше, чем с ПВ1. Столь “дикие” расхождения в значениях пластовых скоростей заставили предположить, что они – результат параметризации неадекватной модели, которая на самом деле не является горизонтально-слоистой. После этого обратная кинематическая задача пересчитывалась в предположении изотропной наклонно-слоистой модели с угловыми и азимутальными несогласиями. Определяемыми параметрами при этом стали углы и азимуты падения, а также глубины подошвы пластов и пластовые скорости для 3, 4 и 5-го пластов, а также пластовые скорости в 6-м пласте, подошва которого расположена ниже забоя скважины. По годографам, полученным с ПВ1, ПВ3 и ПВ4 (первый вариант счета), определяли форму границы к западу от скважины, а по данным с ПВ1, ПВ2 и ПВ3 (второй вариант счета) – к востоку от скважины.

В табл. 2 и 3 приведены результаты обоих вариантов счета. Учитывая близость азимутов падения в каждом из вариантов, оказалось возможным рассчитанные данные представить в виде разреза, пересекающего скважину в направлении, близком к направлению запад-восток (рис. 1). Этот разрез хорошо согласуется с разрезом, полученным путем миграции записей ВСП с подвижным источником колебаний (ВСП-ПИ) (рис. 2). Левый край разреза ВСП-ПИ

Таблица 3

Результаты решения обратной кинематической задачи по данным ВСП с ПВ1, ПВ2 и ПВ3

Номер пласта	Глубина подошвы, м	Угол падения, град	Азимут падения, град	Пластовая скорость, м/с
3	886 ± 7	10 ± 1	112 ± 4	2331 ± 9
4	1634 ± 11	16 ± 1	94 ± 7	3138 ± 22
5	2124 ± 17	13 ± 1	98 ± 6	4174 ± 38
6	–	–	–	4540 ± 16

Таблица 2

Результаты решения обратной кинематической задачи по данным ВСП с ПВ1, ПВ3 и ПВ4

Номер пласта	Глубина подошвы, м	Угол падения, град	Азимут падения, град	Пластовая скорость, м/с
3	865 ± 9	16 ± 1	108 ± 8	2310 ± 6
4	1528 ± 18	26 ± 3	95 ± 10	3150 ± 23
5	2172 ± 22	5 ± 1	95 ± 8	4252 ± 63
6	–	–	–	4592 ± 45

соответствует положению скв. № 32, а правый – скв. № 30. Для того чтобы получить изображение среды в межскважинном пространстве обеих скважин, каждая из них была отработана по методике ВСП-ПИ. Видно, что правее скв. № 32 наблюдается наклонное залегание границ, находящихся на восточном склоне соляного купола (часть слабоконтрастного соляного тела указана стрелкой). Этот пример убедительно иллюстрирует целесообразность сочетания сейсмоизмерений (определение параметров среды путем решения обратной кинематической задачи) и сейсмостроения (формирование изображения среды). Хорошая их сходимость между собой свидетельствует о надежности полученных результатов.

Одновременное определение пластовых скоростей и геометрии границ обеспечило непротиворечивость результатов с различных ПВ. Существенно, что в обоих вариантах расчетов скорости близки к скоростям, определенным с ПВ1. Азимуты падения границ, рассчитанные в каждом из вариантов, близки между собой для каждой из границ, а углы падения, различаясь между собой, имеют одинаковый знак.

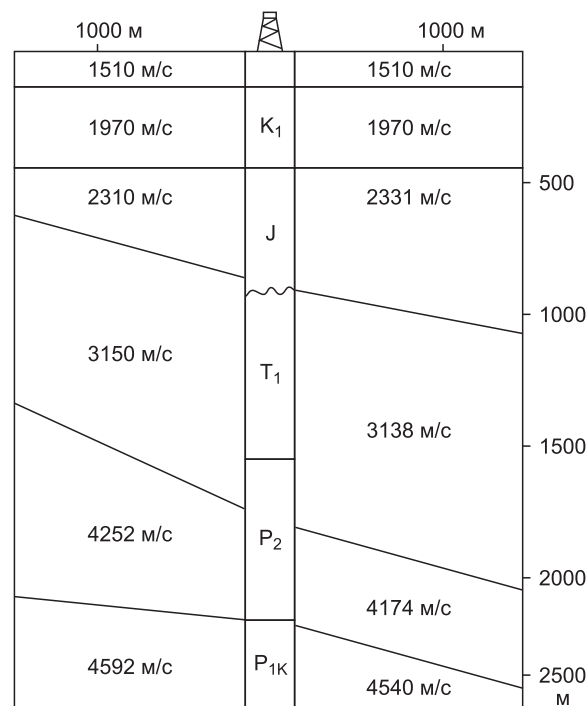


Рис. 1. Модель среды, построенная в результате решения пространственной обратной кинематической задачи. Сква. № 32 Жанажольская (Казахстан).

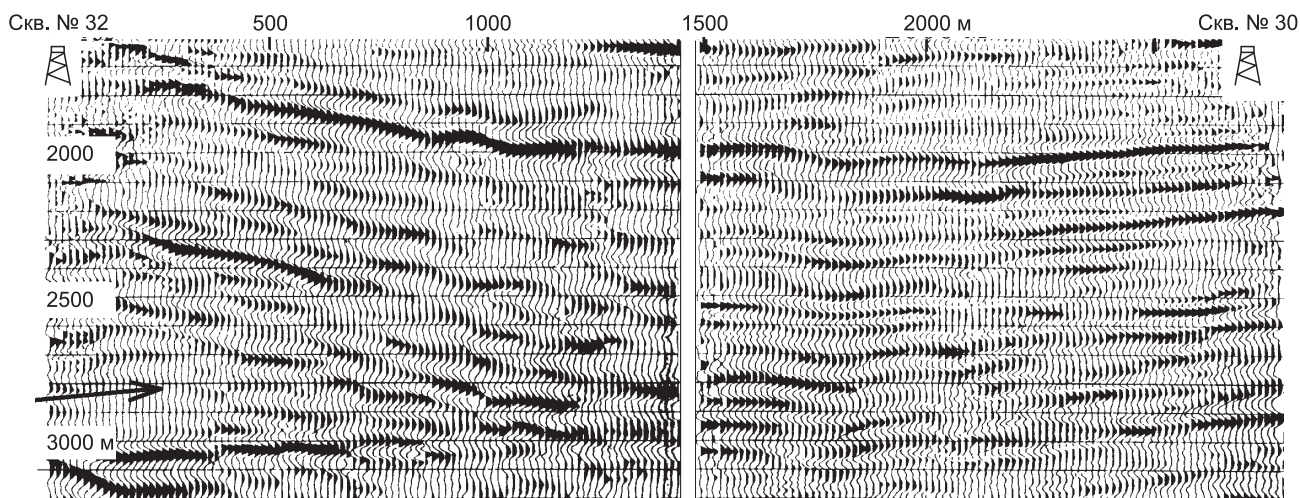


Рис. 2. Фрагмент глубинного разреза ВСП-ПИ, расположенный между скважинами № 32 и № 30. Стрелкой указана восточная часть соляного тела. Участок Жанажол (Казахстан).

Этот пример иллюстрирует справедливость вывода о том, что “в принципе, любую среду можно попытаться аппроксимировать любой моделью” [7]. Действительно, внутренняя достаточно хорошая сходимость результатов далеко еще не убедительно свидетельствует об их достоверности, учитывая некорректность обратных задач. В приведенном примере абсурдность результата, полученного вначале без учета наклона промежуточных границ, сразу же поставила этот результат под сомнение. Однако во многих других случаях, когда сейсмические границы субгоризонтальны, расхождение значений скоростей, рассчитанных с различных ПВ, может также потребовать изменения параметризуемой модели. И вполне возможно, что при этом потребуется перейти от изотропной модели к модели анизотропной. Наиболее сложным пока видится случай, когда модель изучаемой среды является сложно построенной и при этом анизотропной. Последний случай также оставляет простор для фантазии. Дело в том, что в негоризонтально-слоистых трансверсально-изотропных средах с угловыми несогласиями ось симметрии может иметь два возможных направления: ортогонально к подошве пласта (как обычно считают) или ортогонально к кровле пласта. Плоскости напластования слоев, расположенных внутри пласта, могут веерообразно расходиться между его кровлей и подошвой. Решить однозначно этот вопрос без консультации геолога, хорошо представляющего палеогеографию исследуемого участка, может и не удастся.

Таким образом, неадекватность модели, принятой для расчетов пластовых сейсмических скоростей, является одной из главных причин низкой точности скоростей, рассчитанных с разных ПВ. Другая причина нестыковок скоростей, рассчитанных по продольным вертикальным годографам из разноудаленных ПВ, состоит в применении такого давно устаревшего способа обработки, как приведение к вертикали непродольных годографов в предположении однородной среды между источником и приемником колебаний. К сожалению, этот способ применяется нередко и в настоящее время. Более того, приведение продольных вертикальных годографов к вертикали продолжают неоправданно применять при формировании кинематической модели при решении тонких задач в

условиях анизотропных сред [8]. Ясно, что погрешности в определении интервальных, пластовых и средних скоростей, обусловленные неучетом преломления на границах контрастных слоев при приведении к вертикали в предположении однородной среды, могут перекрыть все те тонкие различия в значениях параметров, которые связаны с геологической средой и являются объектом исследований.

Справедливости ради, следует отметить, что при обработке данных ВСП, полученных с ближних ПВ в условиях слабоконтрастной покрывающей толщи, больших ошибок из-за неучета преломления не происходит. Так, оценки на моделях в условиях Западной Сибири показали, что приемлемую точность в определении пластовых скоростей путем приведения годографов к вертикали можно получить при удалениях ПВ от скважины, не превышающих 300 м.

Неучет преломления на промежуточных границах может привести к искажению значений средних и пластовых скоростей, а также к выделению в верхней толще разреза ложных границ. Особенно заметно это проявляется при обработке данных в районах, содержащих в покрывающей толще контрастные пласты (например, в Восточной Сибири). В правомерности применения приведения к вертикали данных с выносных ПВ можно, однако, легко убедиться путем моделирования процедуры приведения к вертикали для конкретного района с известной скоростной моделью (полученной, к примеру, с ближнего ПВ). Если при этом пластовая скорость с выносных ПВ будет отличаться от известной пластовой скорости, то применять подобную устаревшую методику расчетов не следует, а вместо нее целесообразно воспользоваться процедурами определения пластовых скоростей без приведения к вертикали, основанными на методах оптимизации. Для простейшего случая наклонно-слоистой модели алгоритм решения обратной кинематической задачи был описан 25 лет назад [9].

Приведенный выше пример повышения точности определения параметров околоскважинного пространства путем решения обратной кинематической задачи касался наклонно-слоистой модели с границами раздела, залегающими с угловыми и азимутальными несогласиями [10]. Дальнейшее развитие этого подхода позволило справиться с решением обратной

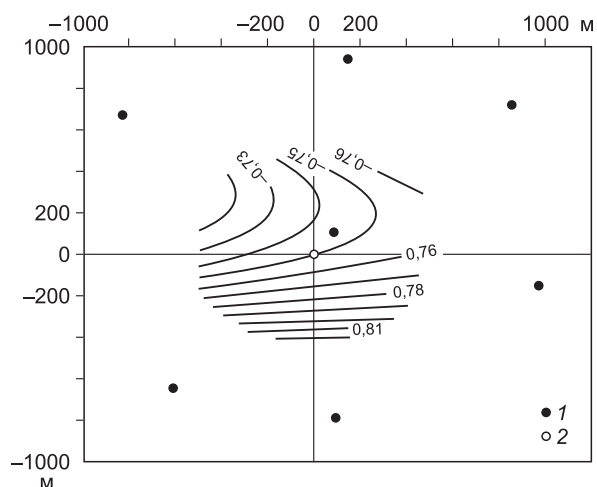


Рис. 3. Структурная схема по кровле коры выветривания фундамента, полученная путем решения обратной кинематической задачи ВСП (Юго-Западная Сибирь).

Скважина находится в начале координат: 1 – пункты возбуждения, 2 – скважина в начале координат.

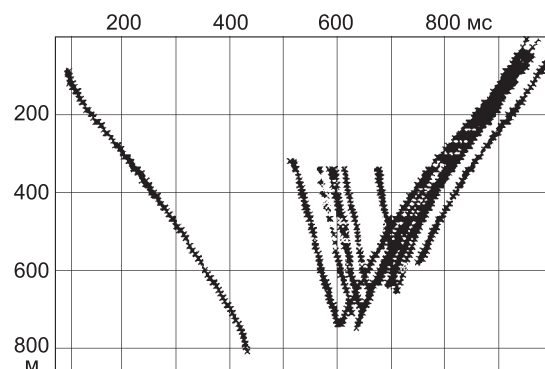


Рис. 4. Наложенные друг на друга наблюдаемые и теоретические годографы прямых волн и волн, отраженных от кровли коры выветривания фундамента (Юго-Западная Сибирь).

кинематической задачи в условиях однородно-слоистых сред с неплоскими границами раздела, аппроксимируемыми бикубическими полиномами [11, 12].

Приведу пример решения обратной пространственной кинематической задачи для среды с неплоскими границами раздела. Существенно, что для решения этой задачи использовали годографы прямых и отраженных продольных волн. Геологическая задача состояла в исследовании 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 величину порядка 1000 м, поэтому попытки получения изображений среды путем миграции записей продольных ВСП оказались не вполне удачными. Основная причина этого состояла 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 изображениях среды [13]. Поэтому обратная кинематическая задача в данном случае позволила получить вполне достоверное представление о геометрии целевой границы. На рис. 3 представлена структурная схема по кровле коры выветривания фундамента. Видно, что скважина находится на юго-восточном склоне поднятия, имеющего более крутое погружение в направлении на юг. На рис. 4 нанесены наблюдаемые годографы прямых и отраженных волн, а также соответствующие теоретические годографы, рассчитанные по модели среды, полученной в результате решения обратной кинематической задачи. Из их совпадения следует, что сходимость результата достаточно высокая.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ

При обработке и интерпретации сейсморазведочных данных детальная скоростная модель наиболее востребована на этапе изучения характеристики резервуара. Возможность использования в наземной

сейсморазведке модели пластовых и интервальных скоростей, полученной методом ВСП, нередко явно недооценивается из-за якобы приуроченности такой модели лишь к области околоскважинного пространства. В платформенных условиях это не так, и здесь экстраполяция данных ВСП на значительные удаления от скважины вполне правомерна, поскольку, по образному выражению Е.А. Козлова [7], природа в таких геологических условиях “позаботилась о мизерных латеральных градиентах скорости”.

Необходимость более детальной, чем при решении структурных задач, взаимосвязки значений скоростей предполагает достижение максимальной детальности данных наземной сейсморазведки (down scaling) при неизбежном снижении разрешенности данных АК путем их осреднения (фильтрации) для достижения “сейсмического уровня” (up scaling). В этом направленном друг к другу процессе уравнивания масштабов с целью достижения одинаковой разрешенности трудно переоценить значимость детальных скоростных моделей, создание которых по силам лишь методу ВСП. Наряду с увязкой промыслово-геофизических и сейсмических реперов, которая давно стала рутинной задачей метода ВСП, все большее значение приобретает задача изучения в сейсмическом диапазоне частот детальных характеристик сейсмокомплексов, выделяемых методом ВСП на этапе формирования толстослойной модели. Возможность изучить тонкослойную структуру толстых пластов, которыми до недавнего времени оперировала наземная сейсморазведка, может позволить, по крайней мере, в условиях спокойного субгоризонтального залегания отложений в платформенных условиях, использовать для миграции и модельных расчетов тонкослойную модель. Она может характеризоваться изотропными характеристиками слоев, в отличие от квазианизотропной толстослойной модели, для которой неизбежны сильные упрощения с целью ее более удобной параметризации при решении обратных кинематических задач и при формировании изображений среды.

Интервальные сейсмические скорости по данным сейсмокаротажа стали определять, как только появились многоточечные зонды. Объяснялось это не только тем, что благодаря им скорость отработки скважины резко возросла, что позволило перейти на шаг наблюдений, в несколько раз меньший, чем был тогда, когда сейсмокаротаж применяли лишь для определения средних скоростей. Дело в том, что с помощью многоточечных зондов путем перекрытия их крайних каналов можно практически полностью исключить влияние статических сдвигов, вызванных нестабильностью источника колебаний, на интервальные скорости, вычисляемые по приращению времен на соседних глубинах.

Внедрение в практику работ ВСП современных невзрывных источников колебаний, отличающихся высокой стабильностью при многократных воздействиях, позволяет не прибегать к перекрытию каналов зонда и при этом определять интервальные скорости с приемлемой точностью. Однако проблема устранения статических сдвигов с записей ВСП все же остается актуальной. Дело в том, что взрывной источник продолжает пока использоваться, причем в значительных объемах работ. Кроме того, невзрывной источник при всей его стабильности не избавляет от таких явлений, как уплотнение забоя, на который воздействует плита источника, и т. д. Тем самым стремление к высокой точности определения интервальных скоростей неизбежно будет сопровождаться потребностью в процедурах, компенсирующих на этапе обработки любые неинформативные отклонения времени прихода сигнала от источника в точку приема.

Нельзя не коснуться вопроса о выборе типов волн, по которым определяют скорости, и выборе их особенностей формы сигнала, по которым осуществляют фазовое прослеживание волн по глубине.

Безотносительно типа волны, в настоящее время в практике обработки данных ВСП редко применяют прослеживание волн по первым вступлениям. И дело здесь не только в том, что, к примеру, в вибросейсморазведке первому вступлению импульса после корреляции виброграммы со свипом соответствует время регистрации главного по модулю экстремума. Область первых вступлений волн часто зашумлена настолько, что и при работе с импульсными источниками прослеживание волн проводят по одной из фаз с последующим учетом статических временных сдвигов при решении обратной кинематической задачи. В настоящее время определение времен прихода волны по одной из выбранных для этого фаз (“пикирование”) осуществляется автоматически. В этом направлении резерв повышения точности состоит в давно известном способе снятия не времен вступлений и не времен регистрации фаз импульса, а времени регистрации, соответствующего половине амплитуды выбранной фазы [14].

Наибольшие трудности при выборе типа волны возникают при определении скоростей поперечных волн. Полвека назад при проведении каротажа на поперечных волнах (КСК) работы проводили с использованием исключительно направленного источника, возбуждающего SH -волны. В настоящее время в практике многоволновой сейсморазведки используют труднодоступные направленные импульсные и непрерывные источники, способные возбуждать колебания

такого типа. Однако даже при использовании ненаправленных источников колебаний (взрывы в неглубоких скважинах), а также наземных источников колебаний с вертикальной направленностью внутри среды регистрируют интенсивные поперечные волны, имеющие “побочную” u -компоненту. Механизм возбуждения колебаний с интенсивной побочной компонентой, о которых неоднократно писал Н.Н. Пузырев и другие исследователи, связывая это явление с анизотропией среды в окрестности источника, еще не вполне изучен. Однако данных, полученных в различных районах разными исполнителями, уже достаточно, чтобы считать этот эффект скорее правилом, чем исключением.

Таким образом, при определении скоростей поперечных волн можно вполне рассчитывать на использование для этой цели волны типа SH , регистрируемой на записях u -компоненты скважинного прибора. Тот факт, что на этой компоненте в горизонтально-слоистых средах не регистрируются ни продольные, ни обменные волны, позволяет рассчитывать на получение годографов поперечных волн с более высокой точностью и надежностью, чем на x -компоненте. В подтверждение этому на рис. 5 приведены волновые поля, полученные на разных компонентах в скв. № 113 Юрубченская, находящейся в Восточной Сибири. Видно, что прямая поперечная волна на u -компоненте прослеживается весьма уверенно, чего нельзя сказать об x -компоненте, на которой эту волну вообще трудно отождествить. Из волн другого типа на u -компоненте здесь можно выделить лишь обменную отраженную волну (указана стрелкой), приуроченную к наклонной отражающей границе, расположенной в копчерской свите рифей.

В скважине на u -компоненте регистрируются не только проходящие волны SH , но и отраженные волны такого же типа. Ясно, что и они могут быть использованы для решения обратной кинематической задачи и формирования изображения среды, повышая тем самым надежность изучения структуры околоскважинного пространства. Уместно напомнить, что эти волны уже стали достаточно успешно использоваться для формирования изображения среды, а также для определения *кажущихся сдвиговых импедансов* [15, 16].

Точность определения скоростей V_S , как правило, ниже, чем скоростей V_P , если скорости определяют с ближнего ПВ. Дело в том, что при ВСП с ненаправленными источниками интенсивность записей на горизонтальных компонентах с ближнего ПВ мала, поэтому сама процедура ориентации записей по первой продольной волне крайне неустойчива, и это негативно сказывается на прослеживании по вертикальному профилю поперечных волн. Повышения точности ориентации достигают путем одновременной отработки скважины с ближнего и выносного ПВ. После определения ориентации зонда с выносного ПВ можно легко вычислить компоненты с ближнего ПВ, имеющие требуемую ориентацию. Применение аппаратной ориентации зонда позволяет получать сейсмограммы ориентированных по странам света компонент непосредственно на скважине, упрощая прослеживание непродольных волн на горизонтальных компонентах и повышая точность определения времен прихода этих волн.

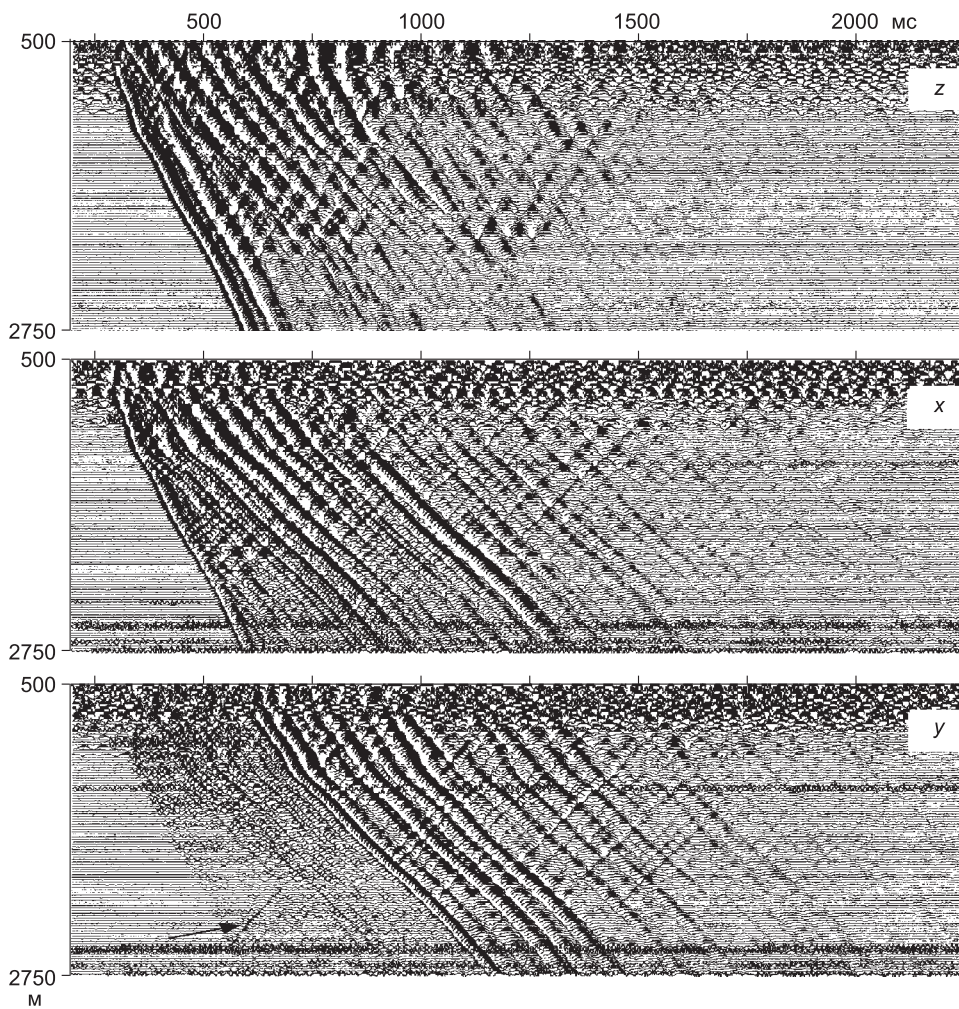


Рис. 5. Пример уверенного прослеживания поперечных волн на y -компоненте (Восточная Сибирь).

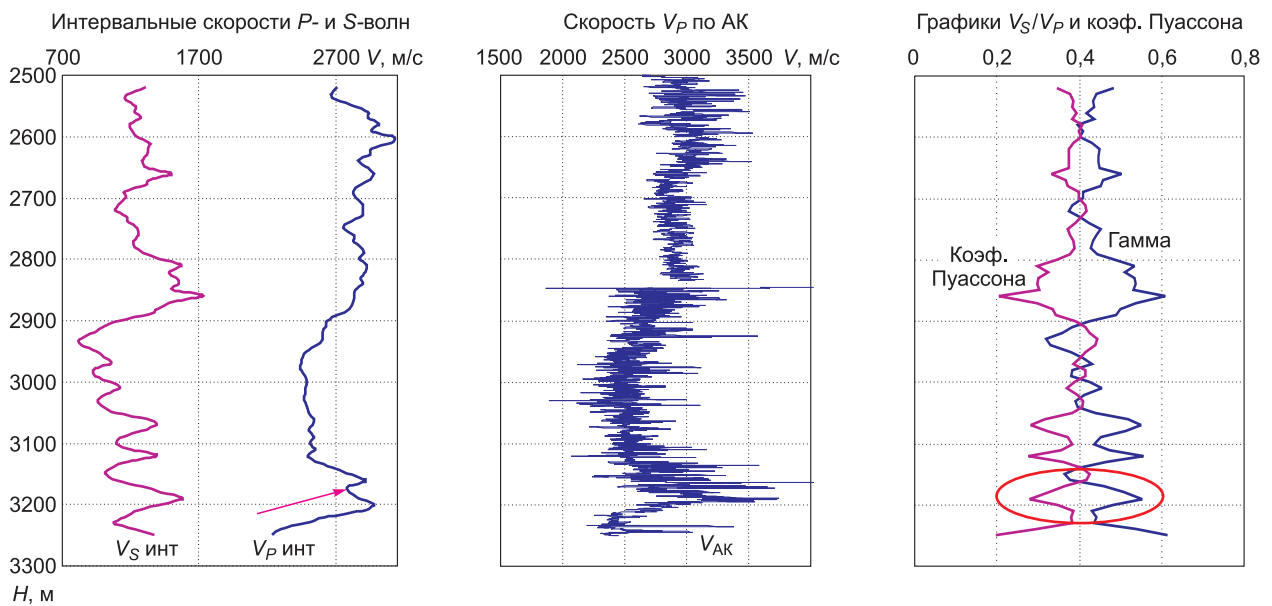


Рис. 6. Графики интервальных параметров (Краснодарский край).

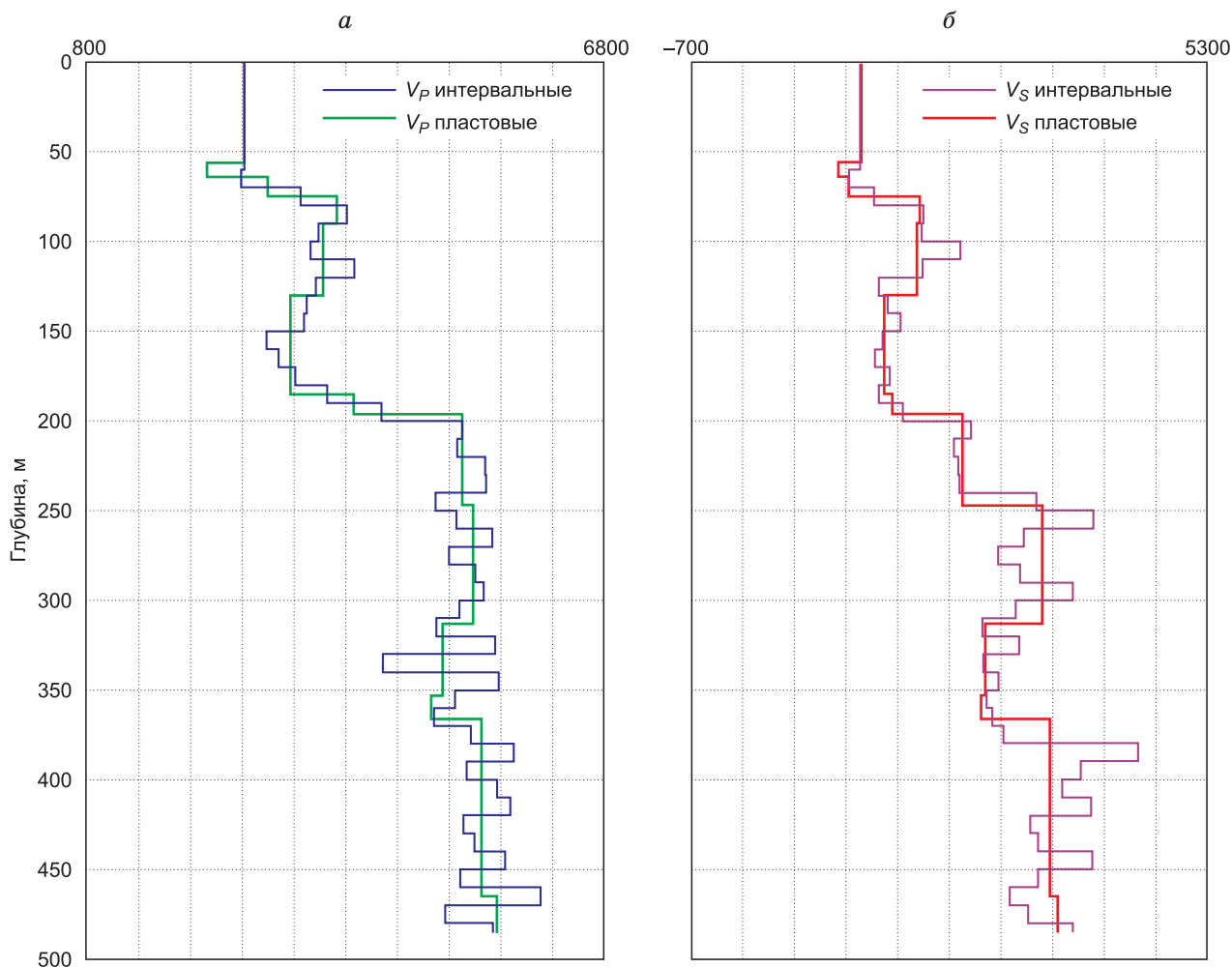


Рис. 7. Интервальные скорости продольных волн (а) и поперечных волн (б).

На графики интервальных скоростей наложены независимо полученные графики пластовых скоростей (Южный Урал).

Существенно повысить точность и детальность при определении интервальных сейсмических скоростей и тем самым приблизиться к детальности методов ГИС удалось благодаря использованию так называемых *дифференциальных вертикальных годографов* [6]. Повышение точности достигается путем устранения статических сдвигов, изменяющих свою величину от одного воздействия к другому, в сочетании с методами оптимизации при решении обратной кинематической задачи. Приведу примеры определения интервальных скоростей с использованием этого подхода.

На рис. 6 представлены интервальные скорости распространения продольных и поперечных волн, рассчитанные на базе 10 м. Интервальные скорости были пересчитаны в интервальные значения коэффициента Пуассона и в значения $\gamma = V_S/V_P$. Графики интервальных скоростей хорошо согласуются с данными АК. На некоторых интервалах наблюдается аномальное поведение интервальных параметров, согласующееся с априорной геологической информацией. К примеру, нефтенасыщенная песчаная пачка, расположенная глубже 3170 м, проявляется понижением интервальной скорости V_P (показано стрелкой) на фоне повышения значения V_S , что приводит к увеличению значения V_S/V_P и к уменьшению значения коэффициента Пуассона (показано эллипсом).

На рис. 7 по одной из скважин, расположенных на рудном месторождении Южного Урала, приведены графики интервальных и пластовых скоростей V_P и V_S . Соответствие интервальных и пластовых скоростей для волн одного и того же типа в целом неплохое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод ВСП является источником наиболее точных значений сейсмических скоростей, необходимых для скважинных и наземных сейсморазведочных исследований. Повышение точности и детальности определения сейсмических скоростей позволяет перейти от выделения сейсмокомплексов в рамках толстослойной модели к изучению их тонкослойной структуры с той степенью разрешенности, которая вытекает из потенциальной предельной разрешенности сейсморазведки в сейсмическом диапазоне частот.

В условиях сложно построенных сред определение скоростной модели независимо по каждому из пунктов возбуждения без учета геометрии границ в околоскважинном пространстве приводит к грубым ошибкам даже несмотря на применение современных подходов к решению обратной кинематической задачи, использующих методы оптимизации. Совместное применение данных с различных ПВ при решении

обратной кинематической задачи гарантирует от грубых промахов и способно обеспечить не только внутреннюю сходимость результата, но и его правдоподобность с геологической точки зрения.

В платформенных условиях, характеризующихся устойчивостью по латерали сейсмических скоростей, рекомендуется использовать тонкослоистую модель, опирающуюся на определение интервальных скоростей методом ВСП вместо упрощенной толстослоистой квазианизотропной модели. Об обоснованности такой замены можно в конкретных геологических условиях судить по результатам математического моделирования для двух альтернативных моделей – толстослоистой анизотропной и тонкослоистой трансверсально-изотропной. Пластовые коэффициенты анизотропии, широко применяемые в наземной сейсморазведке, могут быть определены в методе ВСП непосредственно либо путем расчетов с использованием тонкослоистой модели на продольных и поперечных волнах и данных о плотностях в этих слоях.

Литература

1. Гурвич И.И. Интерпретация данных сейсморазведки в случае анизотропных сред // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1940. № 5. С. 108–116.
2. Tsvankin I., Gaiser J., Grechka V., Van der Baan M., Thomsen L. Seismic anisotropy in exploration and reservoir characterization: An overview // Geophysics. 2010. V. 75, No. 5. P. 75A15–75A29.
3. Берденникова Н.И. Корреляционный сейсмический каротаж разведочных скважин // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Вып. 4. Л.: Наука, 1962. С. 94–109.
4. Leaney S., Tcherkashnev S. In-line VSP processing and integration: Междунар. науч. конф. // SEG. М., 2003.
5. Stewart R.R., Huddleston P.D., Kan T.K. Seismic versus sonic velocities: a vertical seismic profiling study // Geophysics. 1984. V. 49, No. 8. P. 1153–1168.
6. Шехтман Г.А., Попов В.В. Изучение структуры околоскважинного пространства по разностным и дифференциальным вертикальным годографам // Технологии сейсморазведки. 2007. № 3. С. 9–43.
7. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2006. 480 с.
8. Тихонов А.А. Изучение околоскважинного пространства по данным ВСП: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МГУ, 2005. 23 с.
9. Долгов Б.Ф., Шехтман Г.А. Определение сейсмических скоростей по вертикальному годографу без приведения к вертикали // Прикл. геофизика. М.: Недра, 1986. Вып. 114. С. 56–62.
10. Шехтман Г.А., Зернов А.Е. Развитие метода ВСП для поисков и разведки месторождений углеводородов в условиях сложно построенных сред // Тр. 34-го Междунар. геофиз. сем. Будапешт, 1989. С. 635–638.
11. Шехтман Г.А. Пути повышения точности при определении сейсмических параметров методом ВСП // Тр. 36-го Междунар. геофиз. симп. Киев, 1991. Т. I. С. 134–138.
12. Савин И.В., Шехтман Г.А. Обратная кинематическая задача ВСП для сред с неплоскими границами раздела // Прикл. геофизика. М.: Недра, 1995. Вып. 129. С. 34–46.
13. Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Попов В.В. Модификации метода ВСП: какую предпочесть? // Технологии сейсморазведки. 2004. № 1. С. 75–79.
14. Рудницкий В.П. Сейсмические исследования в скважинах. Киев: Наук. думка, 1968. 132 с.
15. Барышев Л.А., Редкоп В.А., Шехтман Г.А. Возможности изучения терригенных коллекторов наземной и скважинной сейсморазведкой в Восточной Сибири // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 64–76.
16. Шехтман Г.А., Кузнецов В.М., Бодякин В.А., Дека А.А. Изучение структуры околоскважинного пространства комплексом модификаций метода ВСП в условиях Восточной Сибири // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 73–82.